

**VŠB-Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Asynchronní kroužkový motor a jeho využití**  
**Slip ring asynchronous motor and its use**

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Tomáš Rybařík**

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Asynchronní kroužkový motor a jeho využití  
Slip ring asynchronous motor and its use

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor asynchronního kroužkového motoru
- 2) Měření na asynchronním kroužkovém motoru
- 3) Vyhodnocení měření
- 4) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) Petrov, G.N.-Elektrické stroje 2, Academia 1982
- 2) Chmelík, K.- Asynchronní a synchronní elektrické stroje, VŠB-TU Ostrava 2002
- 3) Boldea, I.; Nasar, S.A.-The Induction Machine Handbook, CRC Press 2001
- 4) Hrabovcová, V. a kol.- Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilina 2008

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 29.04.2016

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Anotace**

Práce je zaměřena na analýzu provozních vlastností kroužkových asynchronních motorů s hlavním důrazem na vlivy změny rotorového odporu. Práce obsahuje základní soubor měření provozních charakteristik, jejichž výsledků je použito pro stanovení energetické bilance stroje a zároveň pro konstrukci kružnicového diagramu.

Dále je v práci věnován prostor měření motoru při změně rotorového odporu. Výsledky měření jsou doplněny teoretickými výpočty.

Závěr práce je věnován hlubší analýze statorového proudu a momentových charakteristik stroje. V rámci analýzy je provedeno porovnání výsledků získaných měřením, výpočtem z náhradního schématu a rovněž odečtem z kružnicového diagramu.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor, stator, rotor, kroužkový rotor, vinutí stroje, točivé elektromagnetické pole, ztráty motoru, účinník, účinnost, proud nakrátko, rotorový spouštěč, skluz, moment, charakteristika nakrátko, charakteristika naprázdno

## **Annotation**

The work is aimed at analyzing the performance characteristics of ring asynchronous motors with a focus on the effects of changes in the rotor resistance. The thesis contains a basic set of operating characteristics measurements whose results are used to determine the energy balance of the machine and to construct Circle diagram.

Furthermore, there is dedicated space measuring motor when changing the rotor resistance. The measurement results are complemented with theoretical calculations .

The conclusion is devoted to a deeper analysis of the stator current and torque characteristics machinery. The analysis is performed to compare the results obtained from the measurement , calculation of equivalent circuit and also by reading the Circle diagram.

## **Keywords**

Induction motor stator , rotor, rotor ring , winding machines , rotating electromagnetic field , loss of motor power factor , efficiency, short-circuit current , rotor starter , slip, torque characteristic short , characteristic idle

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr bakalářského studia na Fakultě elektrotechniky a informatiky, Vysoké školy Báňské Technické Univerzity Ostrava.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu literatury, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální

Podpis:  .....

V Ostravě dne: 29. 4. 2016

Tomáš Rybařík

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Václavu Čechovi, Ph. D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat rodičům, kteří mě jak morálně, tak finančně během celého studia podporovali, a všem vyučujícím, kteří se na mém vzdělání na VŠB-TUO podíleli

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK .....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>1. OBECNĚ O ASYNCHRONNÍM STROJI.....</b>	<b>14</b>
1.1 VÝZNAM A POUŽITÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....	14
1.1.1 Provedení asynchronního motoru .....	14
1.1.2 Princip vzniku 3f točivého magnetického pole AM.....	15
<b>2. PROVEDENÍ KROUŽKOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....</b>	<b>17</b>
2.1 SPOUŠTĚNÍ MOTORU S KROUŽKOVOU KOTVOU.....	17
2.2 REGULACE RYCHLOSTI PŘÍDAVNÝM ODPOREM V OBVODU ROTORU .....	19
<b>3. URČENÍ VELIKOSTI ROZBĚHOVÉHO ODPORU.....</b>	<b>21</b>
3.1 URČENÍ ROZBĚHOVÉHO ODPORU PRO POŽADOVANÝ ZÁBĚRNÝ MOMENT .....	21
3.2 URČENÍ SKLUZOVÉHO ODPORU $R_{2s}$ Z ROTOROVÝCH HODNOT .....	21
3.3 URČENÍ SPOUŠTĚCÍHO ODPORU Z KRUHOVÉHO DIAGRAMU .....	22
3.4 ODSUPŇOVÁNÍ SKLUZOVÉHO ODPORNÍKU.....	23
<b>4. MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK MOTORU .....</b>	<b>25</b>
4.1 MĚŘENÍ MOTORU NAKRÁTKO.....	25
4.1.1 Teoretický rozbor měření .....	25
4.2.1 Údaje získané měřením .....	25
4.2 MĚŘENÍ MOTORU NAPRÁZDNO .....	27
4.2.1 Teoretický rozbor měření .....	27
4.2.2 Údaje získané měřením.....	27
4.2 MĚŘENÍ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY MOTORU .....	29
4.2.2 Teoretický rozbor měření.....	29
4.2.3 Údaje získané měřením.....	29
<b>5. ENERGETICKÁ BILANCE MOTORU.....</b>	<b>32</b>
5.1 URČENÍ ZTRÁT MOTORU .....	32
<b>6. KONSTRUKCE KRUŽNICOVÉHO DIAGRAMU.....</b>	<b>34</b>
6.1 POSTUP KONSTRUKCE KRUŽNICOVÉHO DIAGRAMU.....	34
<b>7. ANALÝZA PARAMETRŮ .....</b>	<b>36</b>
7.1 ANALÝZA MOMENTU .....	36
7.1.1 Měření jednotlivých odporových stupňů.....	36
7.1.2 Hodnoty momentu získané z kružnicového diagramu: .....	39
7.2 ANALÝZA PROUDU .....	40

7.2.1 Analýza rotorového proudu bez spouštěcího odporu.....	40
7.2.2 Analýza rotorového proudu při připojení rotorového spouštěče.....	42
<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ:.....</b>	<b>43</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>45</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>46</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratk

$L1, L2, L3$ .....	Fázové vodiče napájecí soustavy
$N$ .....	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
$1f, 3f$ .....	Počet fází
$M$ [Nm].....	Moment motoru
$M'$ [Nm].....	Moment při sníženém napětí
$M_n$ [Nm] .....	Jmenovitý moment
$M_{n1}$ [Nm].....	Moment při připojení odporu
$\Phi_m$ [Wb].....	Magnetický tok
$d\vec{S}$ .....	Element plochy statoru
$d\vec{B}$ .....	Element magnetické indukce
$B$ [T].....	Magnetická indukce
$s$ [-] .....	Skluz
$s_n$ [-].....	Jmenovitý skluz
$s$ [-] .....	Skluz
$n$ [Ot/min] .....	Otáčky motoru
$n_s$ [Ot/min] .....	Synchronní otáčky motoru
$R_s$ [ $\Omega$ ] .....	Spouštěcí odpor
$R_1$ [ $\Omega$ ].....	Odpor vinutí statoru
$R_2$ [ $\Omega$ ] .....	Odpor vinutí rotoru
$R_{2v}$ [ $\Omega$ ].....	Vinutí rotoru včetně přechodového odporu na kartáčích
$R_{2s}$ [ $\Omega$ ].....	Skluzový odpor (spouštěcí nebo regulační)
$R_{sf}$ [ $\Omega$ ] .....	Fázová hodnota statorového odporu
$U_n$ [V] .....	Jmenovité napětí
$U'$ [V].....	Snížené napětí motoru
$U_{20}$ [V] .....	Sdružené napětí naprázdno
$\Delta P_{js0}$ [W].....	Jouleovy ztráty statoru naprázdno
$\Delta P_{js1}$ [W] .....	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru
$\Delta P_{js2}$ [W].....	Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru
$\Delta P_{Fe}$ [W].....	Ztráty motoru v železe

$P_{mech}$ [W].....	Mechanický výkon motoru
$\Delta P_{mech}$ [W] .....	Mechanické ztráty motoru
$P_{\delta}$ [W] .....	Výkon ve vzduchové mezeře
$P_p$ [W] .....	Příkon motoru
$P_0$ [W].....	Příkon motoru naprázdno
$I_0$ [A].....	Proud motoru naprázdno
$I_k$ [A].....	Proud motoru nakrátko
$I_{KN}$ [A] .....	Proud nakrátko při jmenovitém napětí
$I_1$ [A] .....	Statorový proud
$\cos \varphi$ [-].....	Účinník motoru
$i_1$ [A/mm] .....	Měřítka proudu
$m_m$ [Nm/mm] .....	Měřítka momentu
$m_p$ [W/mm].....	Měřítka výkonu

## Seznam ilustrací a tabulek

(Obr. 1) Komponenty asynchronního motoru	15
(Obr. 2) Průběhy $F_m$ pro cívku uloženou v jedné drážce	16
(Obr. 3) Průběhy $B$ povrchem statoru pro cívku uloženou v jedné drážce	16
(Obr. 4) Řez kroužkovým motorem	17
(Obr. 5) Spouštění asynchronního motoru s kotvou kroužkovou	18
(Obr. 6) Vliv změny odporu rotoru na kružnicový diagram	18
(Obr. 7) Spuštění asynchronního motoru s kroužkovou kotvou	19
(Obr. 8) Vliv ohmického odporu rotoru na momentovou charakteristiku	20
(Obr. 9) Určení skluzového odporu z kruhového diagramu	22
(Obr. 10) Odstupňování skluzového odporu	24
(Obr. 11) Schéma zapojení pro měření nakrátko	25
(Obr. 12) Charakteristiky motoru nakrátko	26
(Obr. 13) Schéma zapojení pro měření naprázdno	27
(Obr. 14) Charakteristiky motoru naprázdno.	28
(Obr. 15) Schéma zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky.	29
(Obr. 16) Zatěžovací charakteristiky motoru	31
(Obr. 17) Zatěžovací charakteristiky motoru.	31
(Obr. 18) Pracovní oblast momentové charakteristiky motoru.	31
(Obr. 19) Energetické bilance motoru.	32
(Obr. 20) Závislost ztrát v železe na kvadrátu napětí.	33
(Obr. 21) Štítek měřeného motoru.	36
(Obr. 22) Použitý odporník	36
(Obr. 23) Srovnání naměřených průběhů s vypočtenými.	38
(Obr. 24) Porovnání momentu motoru bez zařazeného odporového stupně.	40
(Obr. 25) Srovnání statorového proudu.	41
(Obr. 26) Průběhy statorového proudu při zařazených odporových stupních.	42
(Tab. 1) Štítek motoru	25
(Tab. 2) Tabulka hodnot z měření nakrátko	26
(Tab. 3) Výtažek z naměřených hodnot při měření naprázdno	27
(Tab. 4) Tabulka naměřených hodnot při měření zatěžovacích charakteristik	29
(Tab. 5) Tabulka hodnot pro konstrukci kružnicového diagramu.	34
(Tab. 6) Hodnoty odporů jednotlivých odporových stupňů.	36
(Tab. 7) Vzorek naměřených hodnot pro spouštěcí odporník.	37
(Tab. 8) Vypočítané hodnoty momentu pro jednotlivé stupně odporového spouštěče.	37

(Tab. 9) Srovnání otáček pro jednotlivé stupně při jmenovitém momentu	38
(Tab. 10) Hodnoty momentu odečtené z kružnicového diagramu	38
(Tab. 11) Vypočítané hodnoty skluzu.	40
(Tab. 12) Porovnání otáček při jmenovitém momentu	41
(Tab. 13) Vypočítané a odečtené hodnoty statorového proudu.	41
(Tab. 14) Proudů pro jednotlivé odporové stupně.	42
(Tab. 15) Srovnání proudů při odlišných otáčkách motoru	43

## Úvod

Předkládaná práce se zabývá měřením pracovních charakteristik a analýzou parametrů. K měření byl použit asynchronní kroužkový motor o jmenovitém výkonu 2 kW od firmy MEZ FRENŠTÁT.

Text je rozdělen do sedmi částí. V první části je obecný popis asynchronního motoru, jako jsou např. princip a konstrukce.

Druhá část je zaměřena na asynchronní motor kroužkový. Popisuje rozdílnost konstrukce od běžného asynchronního motoru s klecovým rotorem. Dále kapitola popisuje princip rozběhu a regulaci rychlosti otáčení. Jeden ze způsobů jak řídit rychlost otáčení a rozběh je pomocí odporníku. Způsoby návrhu a odstupňování jednotlivých odporových stupňů jsou popsány ve třetí části mé práce.

Čtvrtá část je věnována měření pracovních charakteristik stroje, jako je např. charakteristika naprázdno nebo nakrátko.

Pátá část pojednává o energetické bilanci stroje. Jsou v ní určeny velikosti jednotlivých složek ztrát.

Šestá část popisuje konstrukci kružnicového diagramu, výpočet měřítek a následovné určení hodnoty jednotlivých parametrů, jako jsou např. jmenovitý proud, maximální moment stroje a jiné.

Sedmá a také poslední část práce je zaměřena na analýzu parametrů stroje, kterými jsou moment a proud. Hodnoty jednotlivých parametrů jsou získány různými způsoby (matematicky, měřením a odčítáním z kruhového diagramu). Takto získané průběhy jsou mezi sebou porovnány a vyhodnoceny.

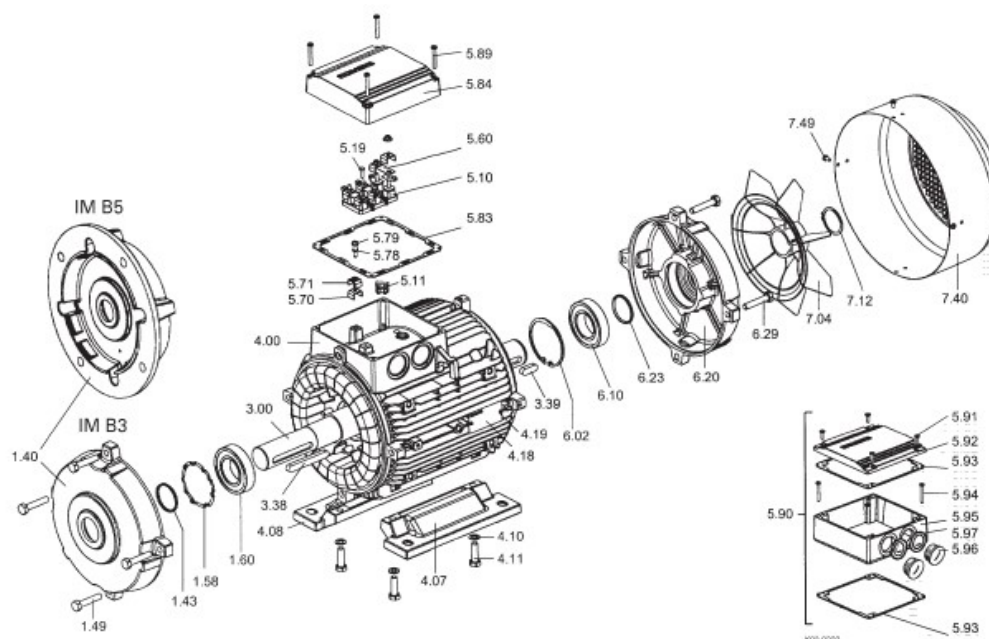
# 1. Obecně o asynchronním stroji

## 1.1 Význam a použití asynchronních motorů

Asynchronní motor patří do velké skupiny elektrických strojů umožňující elektromechanickou přeměnu. Dělíme je na motory, u nichž dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou, a generátory, které mění mechanickou energii na elektrickou. Asynchronní stroje se používají téměř výhradně jako motory s výstupním mechanickým pohybem otáčivým nebo lineárním. Díky své konstrukční a principiální jednoduchosti, tudíž i nižší ceně, jsou v praxi velmi často využívány. Jejich provozní spolehlivost vyžadující nízký stupeň údržby znamená časté využití k pohonům zařízení jednoduchých konstrukcí, ale i provozně rozsáhlých celků. [3]

### 1.1.1 Provedení asynchronního motoru

Jako všechna zařízení, sloužící k elektromechanické přeměně energie, sestává asynchronní stroj z pevné části (statoru) a pohyblivé části, která se u točivých strojů nazývá rotor. Stator se skládá z litinové konstrukce a dvou ložiskových štítů. V kostře statoru jsou zalisovány plechy, které jsou navzájem izolovány a tvoří část magnetického obvodu stroje. Rotorové plechy jsou nalisovány na hřídeli, která se otáčí v ložiskách upevněných v ložiskových štítech, vymezujících polohu rotoru uvnitř statoru. Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera.



(Obr. 1) Komponenty asynchronního motoru.

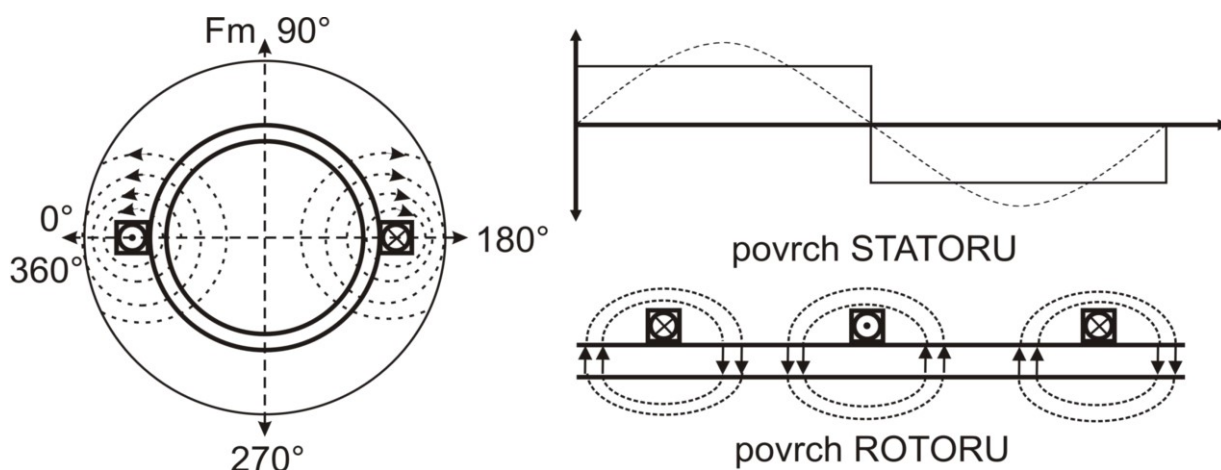
V drážkách statorových a rotorových plechů je uloženo vinutí stroje. Na statoru bývá obvykle trojfázové vinutí (ale může být také jedno a dvoufázové), jehož začátky a konce jsou vyvedeny do svorkovnice. V rotorových drážkách je uloženo vinutí, kterému se říká kotva. U motoru s kotvou nakrátko jsou v drážkách rotoru neizolované měděné nebo mosazné, nejčastěji však hliníkové spojovací kruhy nakrátko. U motorů menších výkonů se vinutí odlévá, spolu s větracími lopatkami z hliníku, metodou tlakového lití. Takovému vinutí se říká klec. [1]

### 1.1.2 Princip vzniku 3f točivého magnetického pole AM

Vinutí jednotlivých fází statoru je uloženo v drážkách a vytváří magnetické pole ve vzduchové mezeře. Toto pole lze znázornit průběhy magnetomotorického napětí  $F_m$ , magnetického toku nebo magnetické indukce  $B$ , které jsou spolu vázány známými vztahy:

$$F_m = R_m \Phi_m = N_c I = \int H d\vec{l} \quad (1.1.2-1)$$

Je zřejmé, že magnetomotorické napětí  $F_m = N_c I$  na sycení magnetického obvodu nezávisí, ale veličiny  $\Phi_m$ , respektive  $B = \frac{\Phi_m}{S}$  na sycení magnetického obvodu závisí. V dalších úvahách předpokládáme nenasyčený magnetický obvod stroje a magnetický odpor železa zanedbatelný vůči magnetickému odporu vzduchové mezery. Na obrázku *Obr. 3.1* jsou znázorněny průběhy  $F_m$  pro cívku uloženou v jedné drážce [1].

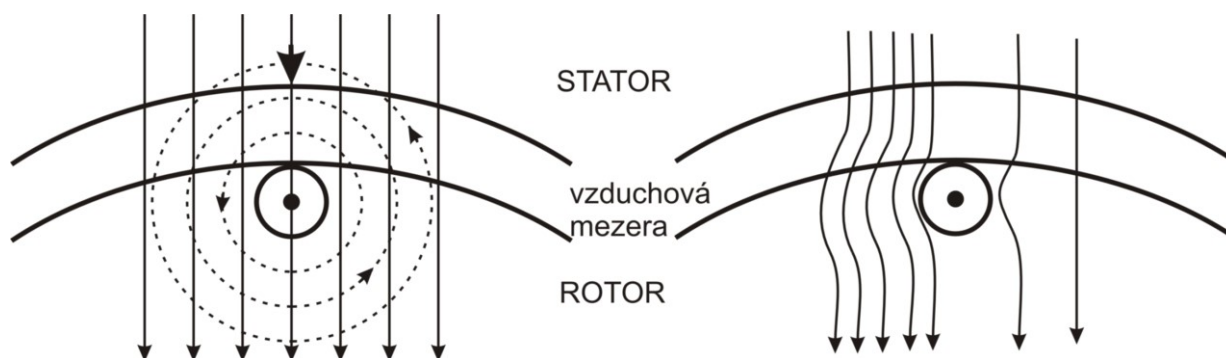


(Obr. 2) Průběhy  $F_m$  pro cívku uloženou v jedné drážce.

Pro následující úvahy vycházím ze IV. Maxwellovy rovnice:

$$\int B d\vec{S} = \Phi \quad (1.1.2-2)$$

$$\Phi = \int BS d\vec{B} d\vec{S} \cos \alpha \Leftrightarrow BS = \Phi \quad (1.1.2-3)$$



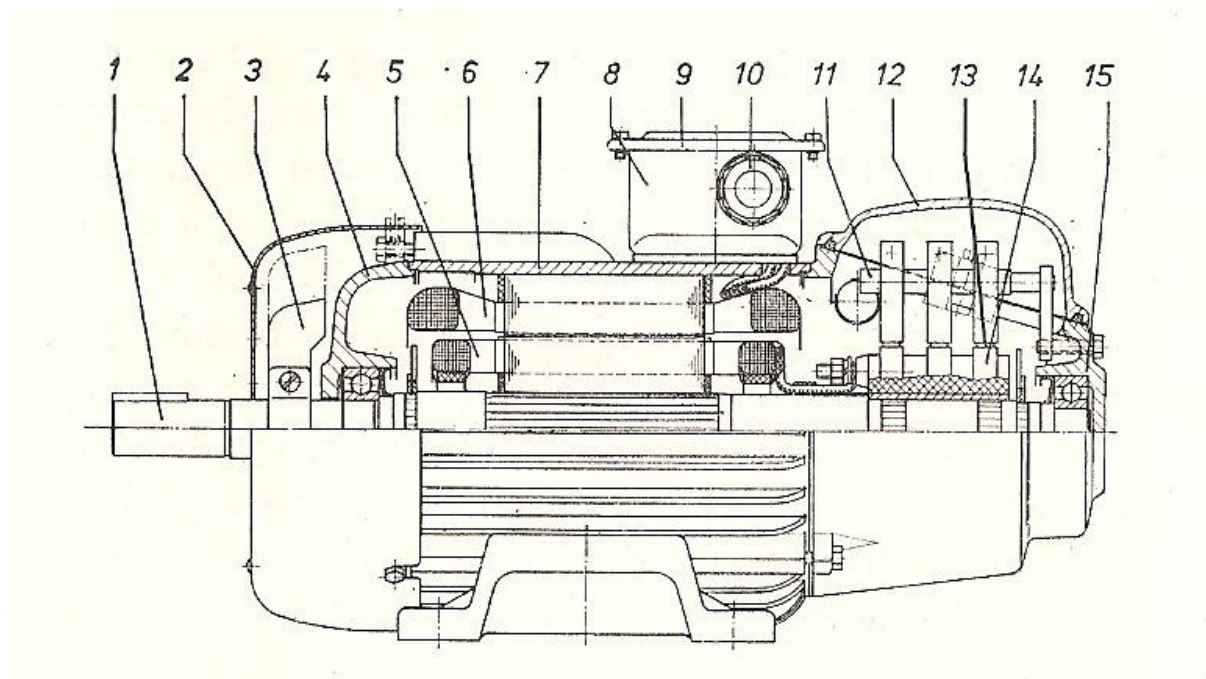
(Obr. 3) Průběhy  $B$  povrchem statoru pro cívku uloženou v jedné drážce.

Protože úhel  $\alpha$  mezi elementy plochy statoru a magnetické indukce je nulový, tedy  $\cos(\alpha)$  je roven jedné, můžeme celý integrál převést na skalární násobení, čímž se celý výraz značně zjednoduší.



## 2. Provedení kroužkového asynchronního motoru.

Motor se liší pouze provedením rotoru. Rotor je složen také z plechů, vinutí je však vinuté a vyvedené na kroužky. U motoru s kroužkovou kotvou se k vinutí rotoru připojuje přes kroužky a kartáče spouštěcí odpor, kterým omezujeme záběrný proud a dosáhneme lepších spouštěcích charakteristik. Po rozběhu je spouštěcí odpor vyřazen, nebo dojde ke spojení kroužků nakrátko a kartáče se nadzvednou aby při běhu nedocházelo k jejím zbytečnému opotřebování. [6]



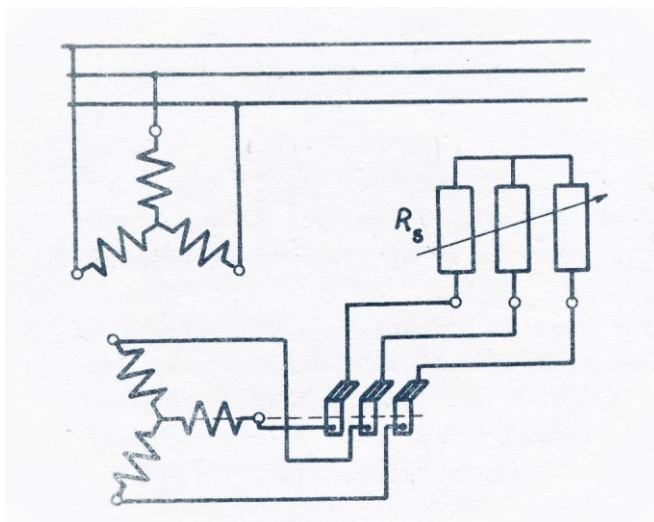
(Obr. 4) Řez kroužkovým motorem. [8]

1- hřídel, 2- kryt ventilátoru, 3- ventilátor, 4- zadní ložiskový štít, 5- rotorové vinutí, 6- satorové vinutí, 7- satorová kostra, 8- svorkovnice, 9- víko svorkovnice, 10- pancéřové ucpávky přívodních vodičů, 11- držák kartáčů, 12- kryt otvoru v ložiskovém štítu, 13- kartáč, 14- kroužek, 15- přední ložiskový štít

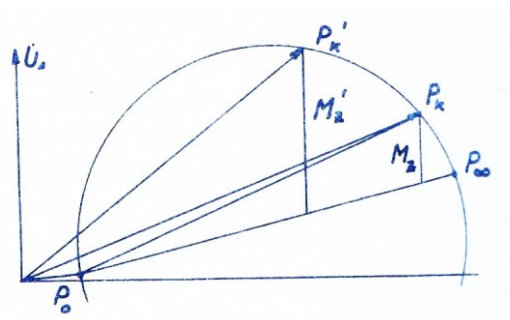
### 2.1 Spouštění motoru s kroužkovou kotvou

Kroužkové asynchronní motory se spouští pomocí odporu  $R_s$ , který je zařazen do obvodu rotoru (Obr. 5). Zvyšuje-li se ohmický odpor, posouvá se bod nakrátko  $P_k$  po kruhovém diagramu k bodu  $P_0$ . Zvětšením odporu (posunutím bodu  $P_k$  do bodu  $P_k'$ ), (obr. 6) dojde ke snížení záběrného proudu a zvýšení záběrného momentu v obvodu rotoru (až do maximálního momentu).

To je dáno zvětšováním činného příkonu a výkonu ve vzduchové mezeře. [1]



(Obr. 5) Spouštění asynchronního motoru s kotvou kroužkovou. [4]



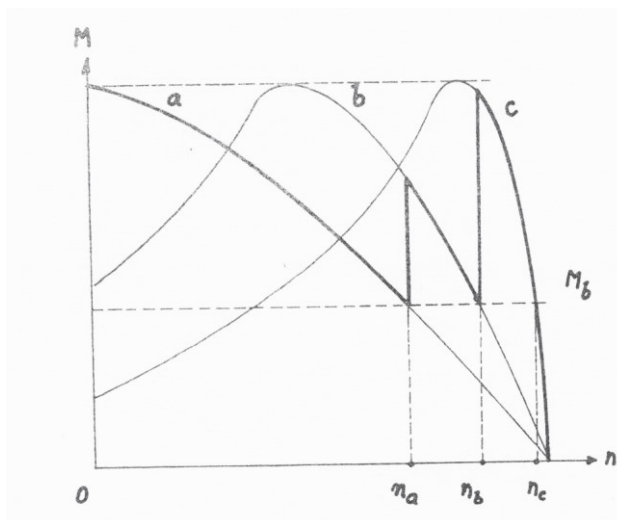
(Obr. 6) Vliv změny odporu rotoru na kružnicový diagram. [4]

Z tohoto hlediska je spouštění motoru pomocí odporu v rotoru velice výhodné. Kdybychom chtěli spouštět motor pomocí odporu ve statoru. Došlo by sice ke snížení záběrného proudu, ale zároveň by se čtvercem napětí statoru došlo ke snížení záběrného momentu.

Spouštěcí odporník volíme tak, aby záběrný moment nepřekročil hodnotu jmenovitého momentu, a spouštěcí proud aby nepřekročil hodnotu dvojnásobku jmenovitého proudu. Spouštěcí odporník dimenzujeme pouze na krátkou dobu zatížení, která je dána dobou rozběhu motoru. Po rozběhu motoru musí dojít k jeho kompletnímu vyřazení. [4]

Na (obr. 8) Jsou tři momentové charakteristiky zatížení  $M_b$ . Při zařazeném nejvyšším spouštěcím odporu (křivka a) je záběrný moment roven momentu maximálnímu a po zapnutí se motor rozbíhá z nulové rychlosti do rychlosti  $n_a$ , při kterém nastane rovnováha momentu motoru a zatížení. Vyřadíme-li jeden stupeň spouštěcího odporníku momentová charakteristika bude mít tvar křivky b, moment motoru vzroste a motor se rozběhne do rychlosti  $n_b$ . Při vyřazení posledního stupně

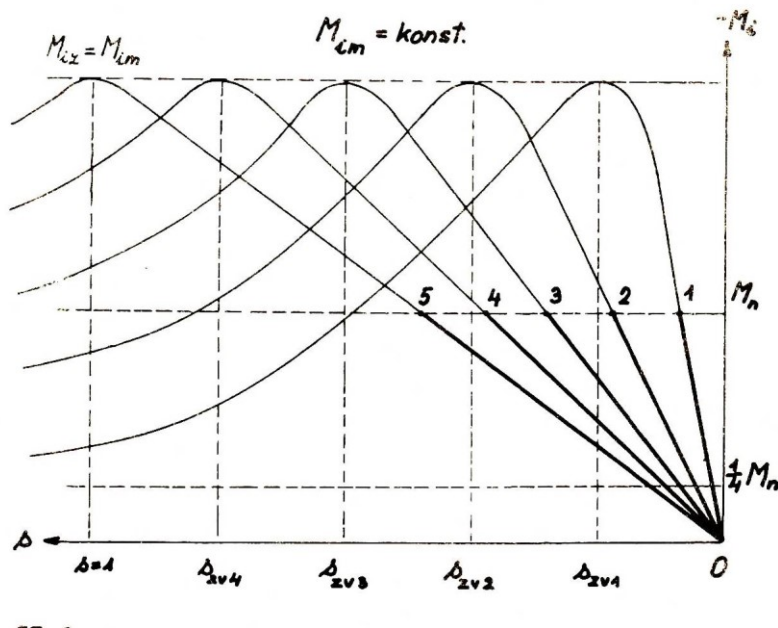
odporníku (křivka c) rychlost motoru vzroste na otáčky  $n_c$ . [4]



(Obr. 7) Spuštění asynchronního motoru s kroužkovou kotvou. [4]

## 2.2 Regulace rychlosti přídavným odporem v obvodu rotoru

V předchozím odstavci bylo uvedeno, že s rostoucím odporem rotoru se momentové charakteristiky svým vrcholem ( $M_{im}$ ) se posouvají ke skluzu záběru (obr. 8). Takže pracovní část charakteristiky už není natolik strmá. Pro danou momentovou charakteristiku zátěže se ustálí rychlost otáčení při různém odporu v rotoru na hodnotě, danou průsečíkem momentových charakteristik motoru a zátěže. V obr. 9 jsou to pro  $M=M_n$  body 1, 2, 3 atd. Rozsah regulace rychlosti otáček při konkrétním rozsahu regulačního odporu v rotoru je závislý na zatížení (např. při  $\frac{1}{4} M$ ) se rychlost otáčení bude měnit v menším rozsahu než při plném zatížení ( $M_n$ ). [4]



(Obr. 8) Vliv ohmického odporu rotoru na momentovou charakteristiku. [4]

Pro regulaci rychlosti otáček nemůžeme používat běžně používaný spouštěcí odpor, protože ten je dimenzován pouze na krátkodobé zatížení. Na rozdíl od odporu pro trvalé zatížení, který musí vydržet trvalé zatížení.

Při regulaci otáček rychlou změnou odporu nastává přechodový jev, při kterém dochází ke zvýšení otáček (odpor v rotoru se sníží) nebo ke snížení otáček až na otáčky stabilního chodu (odpor v rotoru se zvýší). [4]

Jedna z nevýhod tohoto druhu regulace je její neohospodárnost. Máme-li zátěžný moment konstantní, pak i výkon přenášený vzduchovou mezerou stálý, takže i příkon  $P$  podle rovnice je prakticky konstantní. S rostoucím skluzem rostou ztráty v rotoru, zatím co výkon na hřídeli  $P_m$  i účinnost  $\mu$  podle klesá. Z těchto důvodů se tato regulace využívá u motorů menších výkonů.

Regulace rychlosti otáček změnou odporu v rotoru je vyhrazena jen pro motory s kroužkovým rotorem. [4]

### 3. Určení velikosti rozběhového odporu

#### 3.1 Určení rozběhového odporu pro požadovaný záběrný moment

V oblasti stabilního chodu motoru platí úměra mezi rotorovým odporem a skluzem.

Platí tedy:

$$\frac{(R_{2v} + R_{2s})}{s} = \frac{R_{2v}}{s_n} \quad (3.1-1)$$

Motor je spouštěn se jmenovitým momentem  $M_k = M_n$ . Jmenovitému momentu  $M_n$  odpovídá hodnota skluzu  $s = s_n$ . Záběrnému momentu  $M_k = M_n$  odpovídá skluz  $s=1$ .

Platí tedy:

$$\frac{(R_{2v} + R_{2s})}{s} = \frac{1}{s_n} \quad (3.1-2)$$

Dále:

$$s_n \cdot (R_{2v} + R_{2s}) = R_{2v} \quad (3.1-3)$$

$$s_n \cdot R_{2v} = R_{2v} - s_n \cdot R_{2s} \quad (3.1-4)$$

$$R_{2s} = R_{2v} \cdot \frac{1-s_n}{s} \quad (3.1-5)$$

Motor je spouštěn s momentem  $M_k = M_z$ . Momentu zvratu  $M_z$  odpovídá hodnota skluzu  $s = s_z$ . Záběrnému momentu  $M_k = M_z$  odpovídá skluz  $s=1$ .

Platí tedy:

$$R_{2s} = R_{2v} \cdot \frac{1-s_z}{s_z} \quad (3.1-6)$$

#### 3.2 Určení skluzového odporu $R_{2s}$ z rotorových hodnot

Jelikož kroužkový motor má rotorové vinutí zapojeno většinou do hvězdy, je na štítku stroje obvykle uvedena hodnota sdruženého napětí na prázdko  $U_{20}$  a jmenovitý fázový proud  $I_{2n}$ .

V okamžiku spuštění motoru, když jsou nulové otáčky a skluz  $s=1$  je všechna energie přenášena do rotoru přeměněna na ztrátové teplo v obvodu rotoru. Mechanická energie je rovna nule.

[2]

$$P_{el} = s \cdot P_\delta = P_\delta \quad (3.2-1)$$

$$P_{mech} = (1-s) \cdot P_\delta = 0 \quad (3.2-2)$$

Platí tedy:

$$\sqrt{3} \cdot U_{20} \cdot I_2 = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (3.2-3)$$

A z toho celkový rotorový odpor:

$$R_2 = \frac{U_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_2} \quad (3.2-3)$$

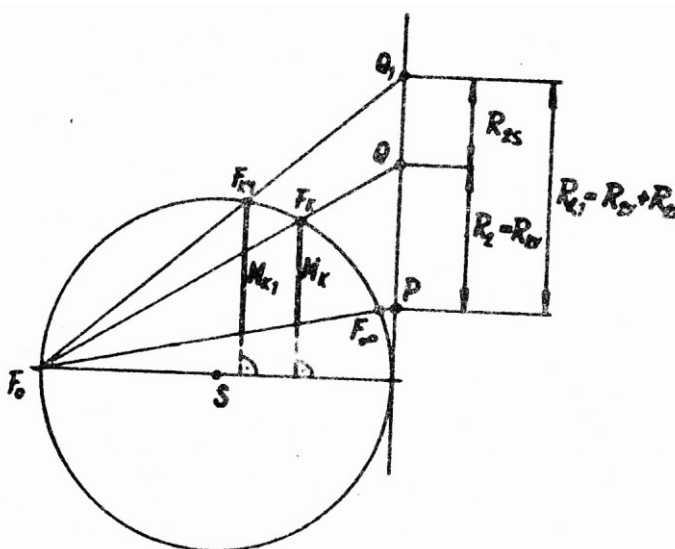
$$R_2 = K \cdot \frac{U_{20}}{I_{2n}} \quad (3.2-4)$$

Konstanta K vyjadřuje vztah mezi záběrným momentem a jmenovitým momentem motoru a také uvažuje vliv rozptylu, obsahuje i přepočet  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ .

Pomocí hodnot  $U_{20}$ ,  $I_{2n}$  a konstanty K pro záběrný moment  $M_k$  vypočteme odpor  $R_2$  a na základě toho vypočítáme skluzový odpor  $R_{2s} = R_2 - R_{2v}$ . [2]

### 3.3 Určení spouštěcího odporu z kruhového diagramu

Velikost spouštěcího odporu můžeme zjistit také za pomoci kruhového diagramu motoru. Určení velikosti spouštěcího odporu je provedeno pomocí (obr. 9). Musí být dodržen požadovaný záběrný moment  $M_{k1}$ . To je splněno posunutím bodu nakrátko  $F_k$  do bodu  $F_{k1}$ , úsečka  $PQ_1$  určuje celkový odpor rotorového obvodu  $R_{21}$ . Velikost skluzového odporu  $R_{2s}$  je pak dána úsečkou  $Q_1Q$ . [2]



(Obr. 9) Určení skluzového odporu z kruhového diagramu. [4]

### 3.4 Odstupňování skluzového odporníku

Počet stupňů rozběhového odporníku se volí podle požadavku na jemnost rozběhu nebo řízení otáček.

Volí se buď nerovnoměrnost momentovou  $q$ , nebo počet stupňů  $n$ .

$$q = \frac{M_{\max}}{M_{\min}} \quad (3.4-1)$$

$$q = \frac{I_{2\max}}{I_{2\min}} \quad (3.4-2)$$

Ze známých hodnot  $R_{2v}$  a  $R_2$  (celkový odpor obvodu rotoru). Vypočítáme např.  $q$  nebo  $n$  podle toho, kterou veličinu si zvolíme. [2]

Příklad výpočtu:

Mějme  $R_2 = 100\% = 1$  a  $R_{2v} = 8\% = 0,08$

Počet stupňů  $n=5$

Dosadíme do vztahu:

$$q^n = \frac{R_2}{R_{2v}} \quad (3.4-3)$$

$$q^5 = \frac{1}{0,08} = 12,5$$

$$q = \sqrt[5]{12,5} = 1,66$$

Celkové odpory na jednotlivých stupních jsou:

$$R_{2v} = 0,08$$

$$q \cdot R_{2v} = 1,66 \cdot 0,08 = 0,132$$

$$q^2 \cdot R_{2v} = 1,66 \cdot 0,132 = 0,220$$

$$q^3 \cdot R_{2v} = 1,66 \cdot 0,220 = 0,366$$

$$q^4 \cdot R_{2v} = 1,66 \cdot 0,366 = 0,606$$

$$q^5 \cdot R_{2v} = 1,66 \cdot 0,606 = 1,000$$

Skluzový odpor se skládá z těchto stupňů:

$$R_{2v} = 0,08$$

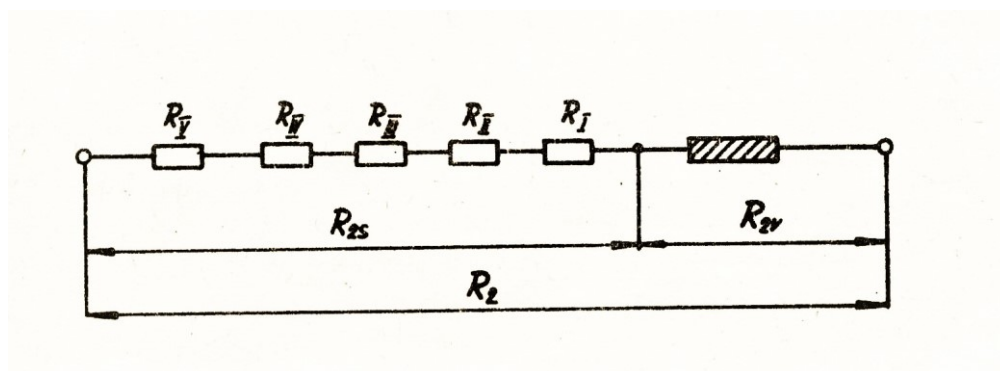
$$R_1 = 0,132 - 0,080 = 0,052$$

$$R_2 = 0,220 - 0,132 = 0,088$$

$$R_3 = 0,366 - 0,220 = 0,146$$

$$R_4 = 0,606 - 0,366 = 0,240$$

$$R_5 = 1,000 - 0,606 = 0,394$$



(Obr. 10) Odstupňování skluzového odporu. [2]



## 4. Měření charakteristik motoru

Výrobce	ZSE MEZ Frenštát
Výrobní číslo	No 9400203
Krytí	IP44
Jmenovité otáčky	$n = 905$ (Ot/min)
Stator	Y, 380 V, 7,4 A
Rotor	Y, 90 V, 15,5 A
Frekvence	50 Hz
TYP	P11M06
	$u = -30/+50$ °C
	S3 40% 50Hz
	ČSN 350300

(Tab. 1) Štítek měřeného motoru

### 4.1 Měření motoru nakrátko

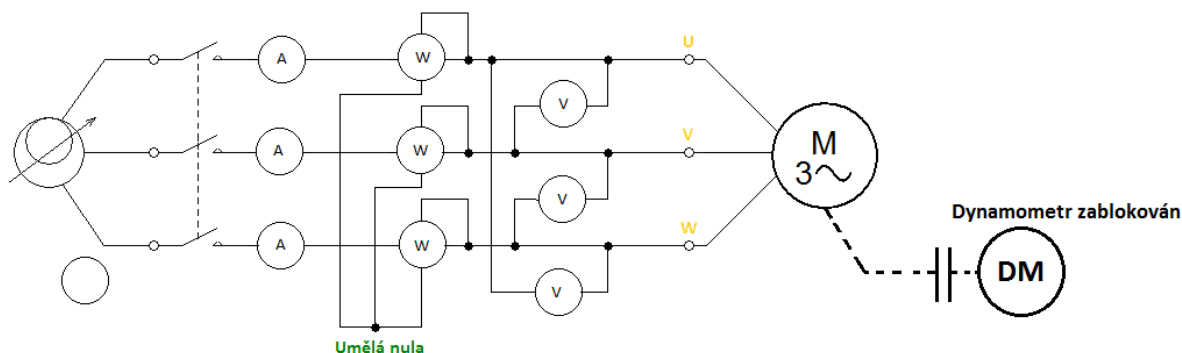
#### 4.1.1 Teoretický rozbor měření

Účelem měření nakrátko je zjištění proudu motoru nakrátko, ztráty nakrátko a účinník nakrátko. Při zkoušce nakrátko neodebíráme ani nedodáváme žádnou mechanickou energii, takže celý příkon odebíraný motorem ze sítě je spotřebován na krytí ztrát, které se mění na teplo.

Při připojení jmenovitého napětí na svorky motoru protéká jeho vinutím několikanásobně vyšší proud, než je jmenovitý. Celá energie dodávaná motoru se mění na teplo, které velmi rychle zvyšuje teplotu rotorového i statorového vinutí. Tím hrozí porušení izolace vinutí.

Z tohoto důvodu se zkouška provádí při sníženém napětí a to tak aby proud nakrátko nepřekročil jmenovité hodnoty. [5]

#### 4.2.1 Údaje získané měřením



(Obr. 11) Schéma zapojení pro měření nakrátko. [6]

U1 (V)	U2 (V)	U3 (V)	I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)	cosφ1	cosφ2	cosφ3	f (Hz)	P1 (W)	M (Nm)	n (ot/min)	s (%)	Up (V)	Ip (A)	cosφ
40,73	41,39	39,86	4,56	4,64	4,55	0,65	0,67	0,66	49,99	370,69	1,47	0,00	100,00	40,66	4,59	0,66
54,61	56,02	54,20	6,12	6,28	6,15	0,65	0,68	0,66	49,99	678,21	3,14	0,00	100,00	54,95	6,18	0,67
74,45	75,54	73,37	8,31	8,42	8,30	0,66	0,68	0,67	49,98	1253,97	6,28	0,00	100,00	74,45	8,35	0,67
84,17	85,47	82,95	9,35	9,49	9,34	0,67	0,69	0,68	49,99	1614,02	7,95	0,00	100,00	84,20	9,39	0,68
91,27	93,19	89,93	10,07	10,24	10,05	0,68	0,70	0,69	49,99	1913,98	9,61	0,00	100,00	91,46	10,12	0,69

(Tab. 2) Tabulka hodnot z měření nakrátko.

Výpočty pro 1. řádek tabulky:

Napětí nakrátko:

$$U_p = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3} = \frac{40,73 + 41,39 + 39,86}{3} = 40,66[V] \quad (4.2.1-1)$$

Proud nakrátko:

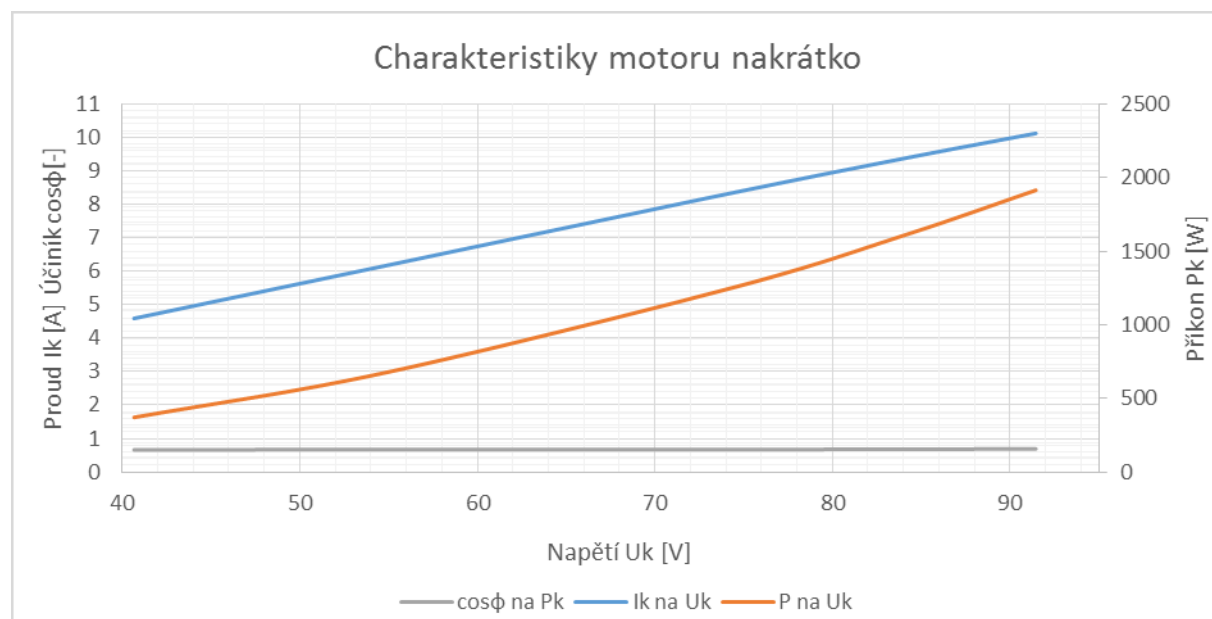
$$I_K = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{4,56 + 4,64 + 4,55}{3} = 4,59[A] \quad (4.2.1-2)$$

Příkon:

$$P_1 = P_1 + P_2 + P_3 = 370,69[W] \quad (4.2.1-3)$$

Účinník:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{3 \cdot U_p \cdot I_p} = \frac{370,69}{3 \cdot 40,66 \cdot 4,59} = 0,6620 \quad (4.2.1-4)$$



(Obr. 12) Charakteristiky motoru nakrátko.

## 4.2 Měření motoru naprázdno

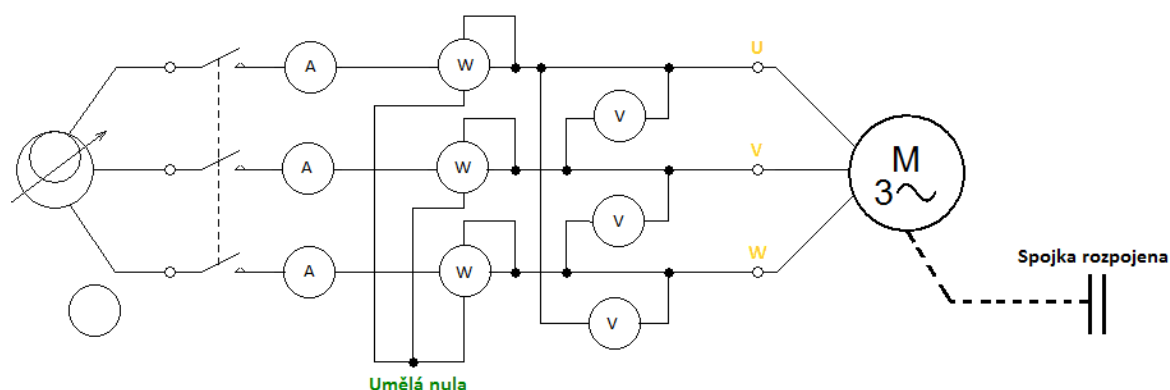
### 4.2.1 Teoretický rozbor měření

Účelem měření naprázdno je zjistit proud naprázdno, účinník naprázdno, ztráty v železe a ztráty mechanické. Chodem naprázdno se rozumí ustálený chod při napájení satorového vinutí a rotorem spojeným nakrátko. Motor je nezatížen a točí se otáčkami blízcími se otáčkám synchronním

Při měření nakrátko je sator napájen souměrným regulovatelným napětím se konstantním kmitočtem. Před vlastním měřením se motor určitou dobu zabíhá, aby došlo k ustálení ztrát v ložiscích.

Po rozběhu odebírá motor ze sítě malý příkon  $P_0$ , tento příkon se spotřebuje pro krytí ztrát naprázdno  $\Delta P_0$  (Ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$  a ztráty mechanické  $\Delta P_{mech}$ ) a ztráty ve vinutí satoru  $\Delta P_{js0}$ , způsobené proudem naprázdno  $I_0$ . [5]

### 4.2.2. Údaje získané měřením



(Obr. 13) Schéma zapojení pro měření naprázdno. [6]

U1 (V)	U2 (V)	U3 (V)	I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)	cosφ 1	cosφ 2	cosφ 3	f (Hz)	P1 (W)	M (Nm)	n (ot/min)	s (%)	Up (V)	Ip (A)	cosφ
251,87	254,36	248,44	8,40	8,58	8,37	0,14	0,18	0,17	49,99	1018,90	0,00	998,00	0,20	251,56	8,45	0,16
236,58	238,13	232,17	7,06	7,07	6,94	0,13	0,17	0,15	49,99	740,68	0,00	998,00	0,20	235,63	7,02	0,15
225,84	227,42	221,57	6,27	6,28	6,14	0,12	0,17	0,14	49,99	596,20	0,00	998,00	0,20	224,94	6,23	0,14
212,84	215,23	209,42	5,50	5,61	5,39	0,11	0,16	0,14	49,99	475,57	0,00	998,00	0,20	212,50	5,50	0,14
200,05	201,87	196,69	4,90	4,96	4,81	0,11	0,16	0,13	49,98	387,56	0,00	998,00	0,20	199,53	4,89	0,13
190,40	192,55	187,29	4,52	4,60	4,40	0,10	0,16	0,14	49,99	338,50	0,00	998,00	0,20	190,08	4,51	0,13
179,20	181,10	176,04	4,13	4,18	4,00	0,10	0,16	0,13	49,99	293,77	0,00	998,00	0,20	178,78	4,10	0,13
168,36	170,17	165,06	3,82	3,84	3,65	0,10	0,17	0,13	49,99	255,69	0,00	998,00	0,20	167,86	3,77	0,13

(Tab. 3) Výtažek z naměřených hodnot při měření naprázdno.

Výpočty pro 3. řádek tabulky:

Napětí naprázdno:

$$U_0 = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3} = \frac{225,84 + 227,42 + 221,57}{3} = 224,94 [V] \quad (4.2.2-1)$$

Proud naprázdno:

$$I_0 = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{6,27 + 6,28 + 6,14}{3} = 6,230 [A] \quad (4.2.2-2)$$

Příkon naprázdno:

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3 = 596,2 [W] \quad (4.2.2-3)$$

Ztráty ve vinutí statoru naprázdno, vycházíme ze známého vztahu  $\Delta P_{js0} = 3 \cdot R_{sf} \cdot I_{0f}^2$  pro hodnoty fázového odporu. Jelikož známe sdruženou hodnotu odporu  $R_{ss}$  tak se vztah změní následovně:

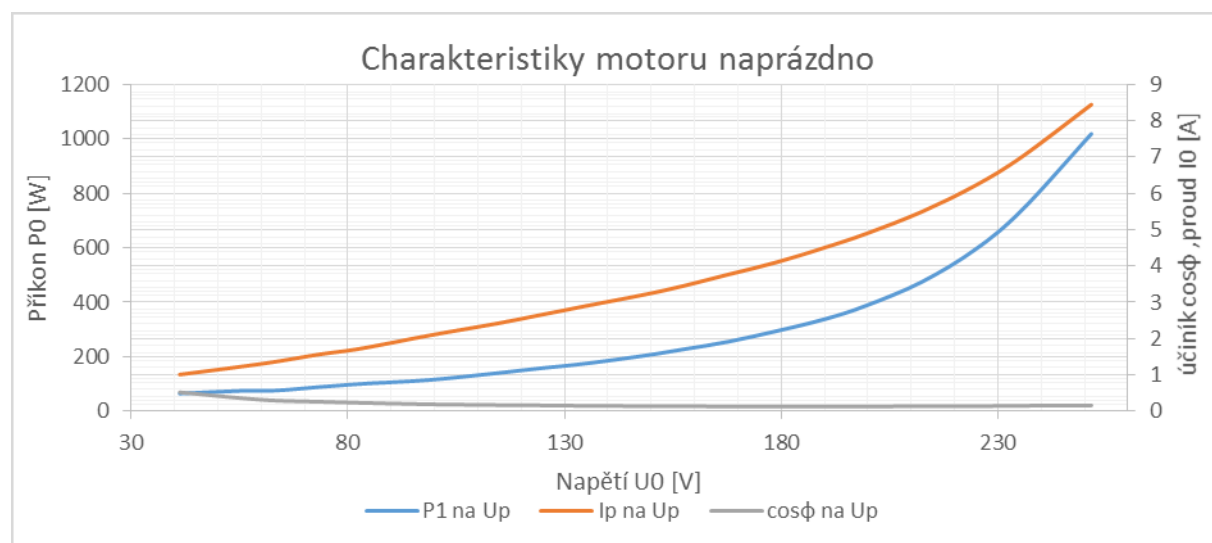
$$\Delta P_{js0} = 1,5 \cdot R_{ss} \cdot I_{0f}^2 = 1,5 \cdot 5,4 \cdot 6,23^2 = 314,38 [W] \quad (4.2.2-4)$$

Ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = P_0 - \Delta P_{js0} = 596,2 - 314,38 = 281,82 [W] \quad (4.2.2-5)$$

Účinník naprázdno:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_0 \cdot I_0} = \frac{596,2}{3 \cdot 224,94 \cdot 6,23} = 0,1418 \quad (4.2.2-6)$$



(Obr. 14) Charakteristiky motoru naprázdno.

## 4.2 Měření zatěžovací charakteristiky motoru

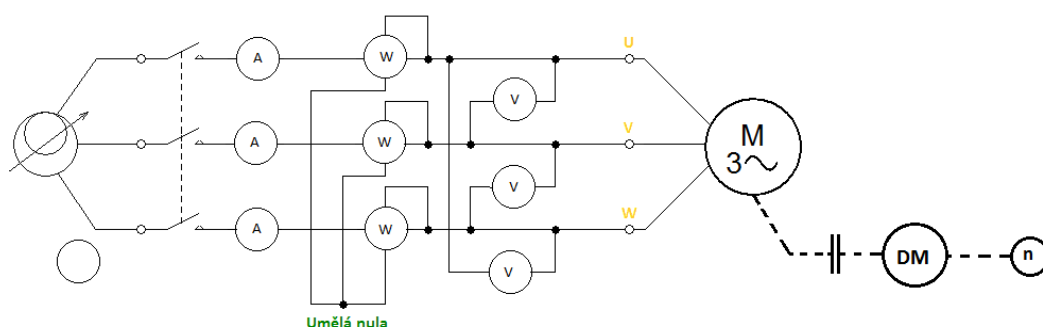
### 4.2.2 Teoretický rozbor měření

Pracovní charakteristiky asynchronního stroje vyjadřují závislost různých veličin (proudu, příkonu, skluzu, účinnosti a účinníku) na výkonu při konstantním satorovém napětí a frekvenci. Určují se postupnou změnou zatížení stroje od přetížení (asi  $1,5 P_n$ ) až do chodu naprázdno.

Před začátkem měření charakteristik je doporučeno motor zahřát při 75% jmenovitého zatížení, aby se teplota vinutí rotoru i satoru ustálila. Měření provádíme od nejvyššího zatížení, a postupně motor odlehčujeme. To provádíme proto, aby se udržela stejná teplota vinutí po celou dobu měření.

Zkoušený motor zatěžujeme dynamometrem. [5]

### 4.2.3 Údaje získané měřením



(Obr. 15) Schéma zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky. [6]

U1 (V)	U2 (V)	U3 (V)	I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)	cosφ 1	cosφ 2	cosφ 3	f (Hz)	P1 (W)	M (Nm)	n (ot/min)	s (%)	Up (V)	Ip (A)	cos φ	P2 (W)	P2 (%)	η(%)
223,94	225,26	220,32	8,01	8,07	8,02	0,69	0,7	0,7	49,96	3741,13	27,47	898	10,2	223,18	8,03	0,7	2583,32	129,16	69,05
223,81	225,34	220,27	7,26	7,37	7,29	0,62	0,64	0,64	49,96	3096,14	23,05	918	8,2	223,14	7,31	0,63	2215,85	110,79	71,56
223,99	225,65	220,61	6,61	6,73	6,65	0,51	0,53	0,53	49,97	2354,31	18,64	933	6,7	223,41	6,63	0,53	1821,19	91,05	77,33
224,7	226,21	221,21	6,36	6,46	6,39	0,43	0,46	0,45	49,97	1921,63	14,71	947	5,3	224,04	6,45	0,45	1458,78	72,93	75,91
224,32	226,31	221,15	6,31	6,49	6,37	0,43	0,45	0,45	49,97	1901,75	12,75	955	4,5	223,93	6,39	0,44	1275,09	63,75	67,04
224,79	226,24	221,28	6,19	6,28	6,21	0,35	0,37	0,36	49,98	1509,38	8,83	967	3,3	224,13	6,23	0,36	894,16	44,70	59,24
225,19	226,89	221,87	6,13	6,26	6,17	0,27	0,29	0,29	49,97	1184,46	7,36	973	2,7	224,65	6,19	0,28	749,92	37,49	63,31
225,26	226,85	221,78	6,12	6,24	6,13	0,24	0,27	0,26	49,98	1058,71	5,89	977	2,3	224,63	6,16	0,25	602,61	30,13	56,91
225,65	226,98	221,86	6,18	6,26	6,16	0,19	0,22	0,21	49,96	857,21	3,92	981	1,9	224,83	6,2	0,2	402,70	20,13	46,97
224,12	225,8	220,4	6,11	6,22	6,07	0,14	0,18	0,17	49,95	675,84	2,45	987	1,3	223,44	6,13	0,16	253,18	12,65	37,46

(Tab. 4) Tabulka naměřených hodnot při měření zatěžovacích charakteristik.

Výpočty pro 1. řádek tabulky:

Aritmetický průměr naměřených napětí:

$$U_p = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3} = \frac{223,9 + 225,26 + 222,32}{3} = 223,16[V] \quad (4.3.3-1)$$

Aritmetický průměr naměřených proudů:

$$I_p = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{8,01 + 8,07 + 8,02}{3} = 8,0333[A] \quad (4.3.3-2)$$

Algebraický součet hodnot wattmetrů:

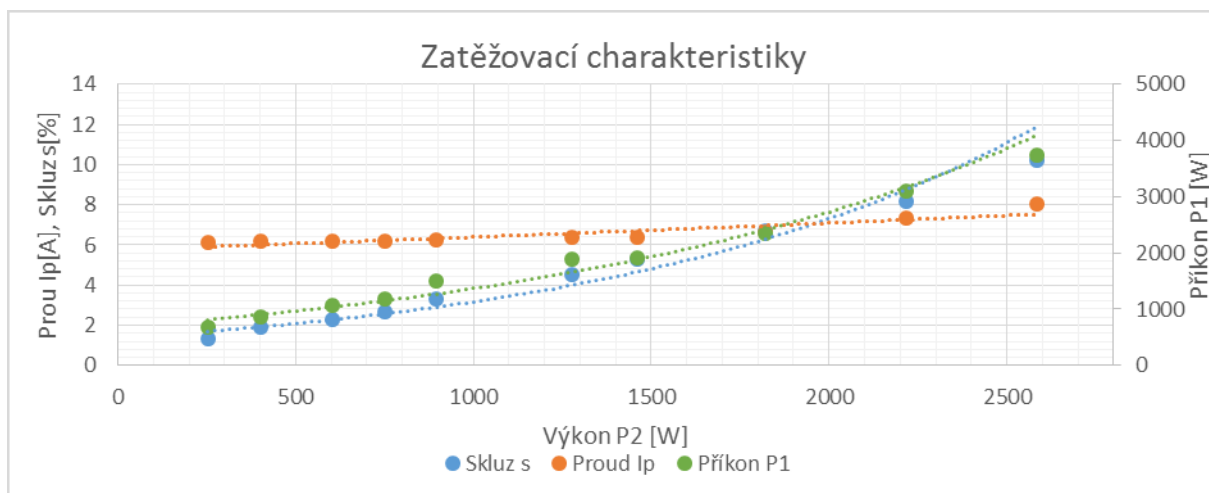
$$P_1 = P_1 + P_2 + P_3 = 3741,13[W] \quad (4.3.3-3)$$

Výkon na hřídeli motoru:

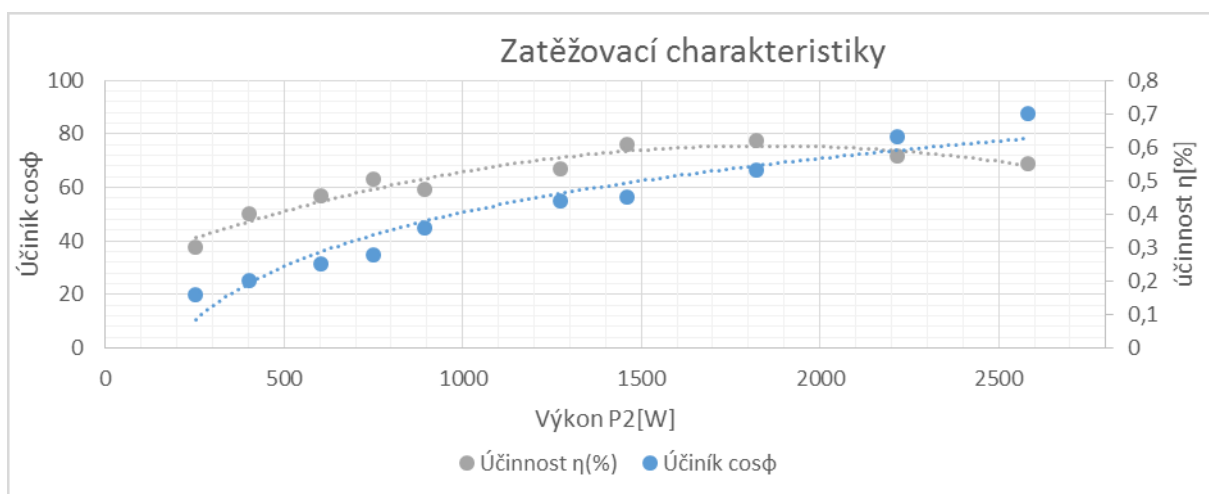
$$P = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 27,47 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 898}{60} = 2583,23[W] \quad (4.3.3-4)$$

Účinník stroje:

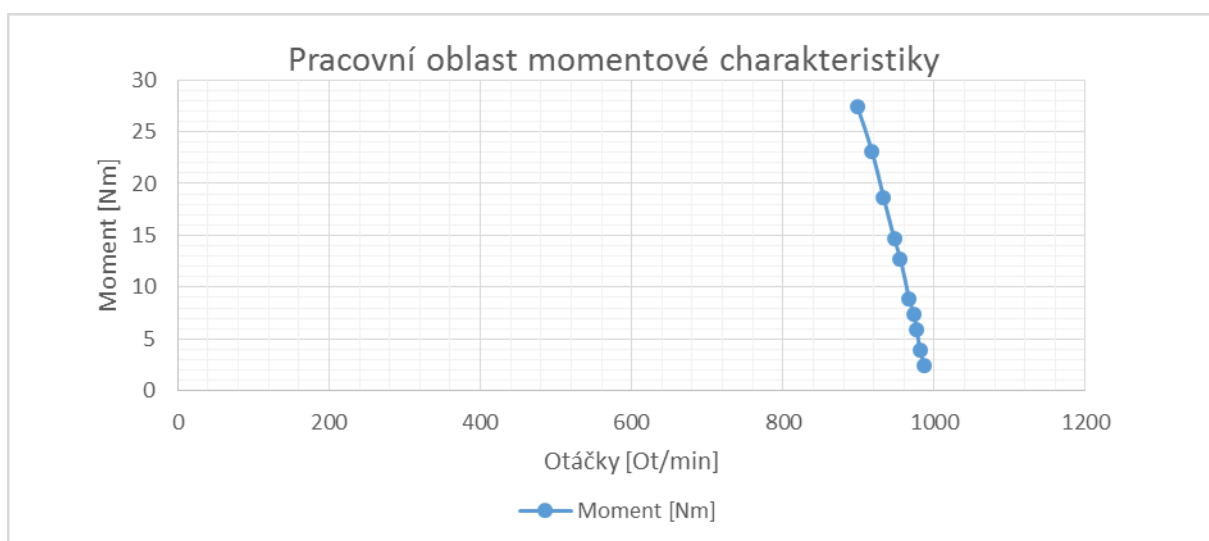
$$\cos \varphi = \frac{P_1}{3 \cdot U_p \cdot I_p} = \frac{3741,13}{3 \cdot 223,16 \cdot 8,03} = 0,695 \quad (4.3.3-5)$$



(Obr. 16) Zatěžovací charakteristiky motoru.



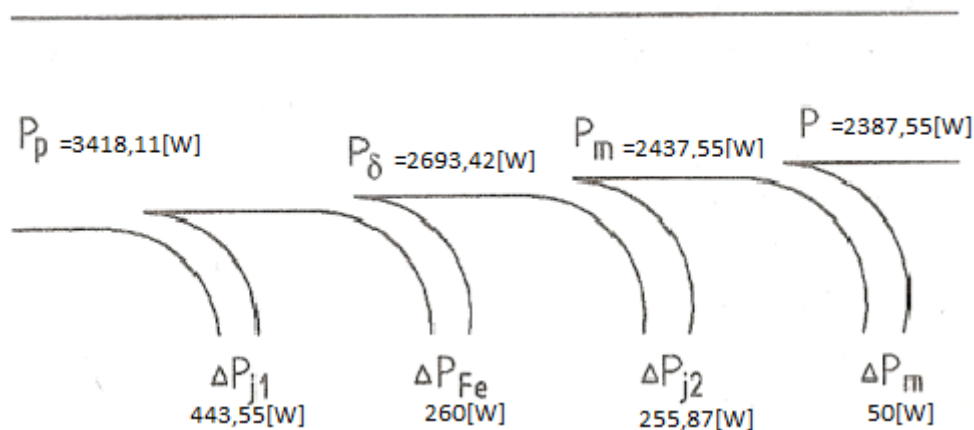
(Obr. 17) Zatěžovací charakteristiky motoru.



(Obr. 18) Pracovní oblast momentové charakteristiky motoru.

## 5. Energetická bilance motoru.

### 5.1 Určení ztrát motoru



(Obr. 19) Energetické bilance motoru. [7]

Určení ztrát motoru z hodnot uvedených na štítku motoru:

Jako první určíme příkon motoru:

$$P_p = m_s \cdot U_{sf} \cdot I_{sf} \cdot \cos \varphi_s = 3 \cdot 220 \cdot 7,4 \cdot 0,7 = 3418,8[W] \quad (5.1-1)$$

Výpočet jouleových ztrát, statorového vinutí:

Protože hodnota statorového odporu  $R_s$  je sdružená dosazujeme na místo  $m_s$  číselnou hodnotu 1,5.

$$\Delta P_{j1} = m_s \cdot R_s \cdot I_{sf}^2 = 1,5 \cdot 5,4 \cdot 7,4^2 = 443,556[W] \quad (5.1-2)$$

Ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$  určíme z měření naprázdno.

$$\Delta P_{Fe} = P_0 - \Delta P_{js0} = 596,2 - 314,38 = 281,82[W] \quad (5.1-3)$$

Dále určíme výkon točivého pole ve vzduchové mezeře  $P_\delta$

$$P_\delta = P_p - (\Delta P_{js} + P_{Fe}) = 3418,8 - (443,556 + 281,82) = 2693,42[W] \quad (5.1-4)$$

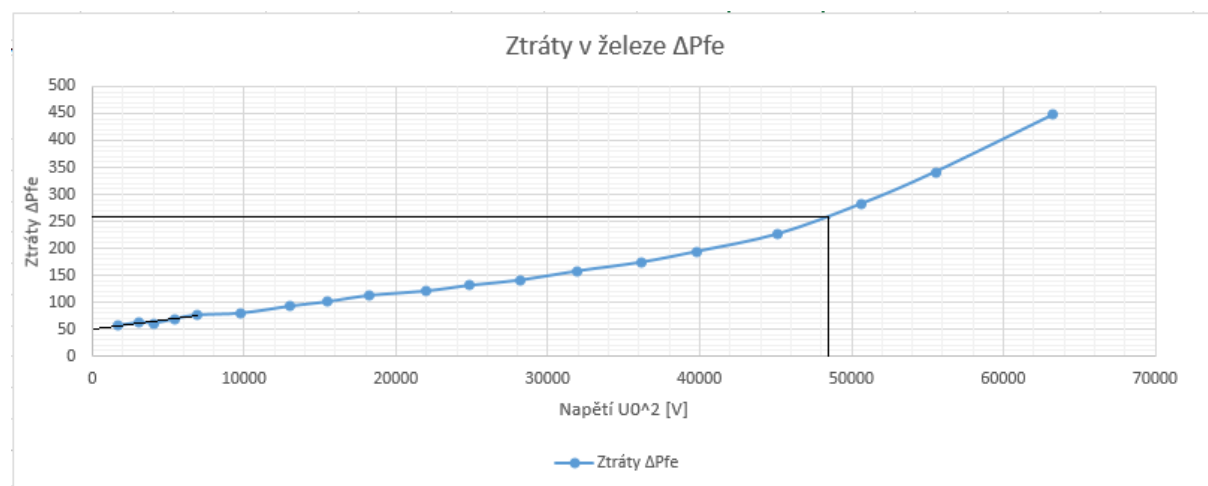


Pro jouleovy ztráty v rotoru platí:

$$\Delta P_{j2} = m_s \cdot R_r \cdot I_r^2 = s \cdot P_\delta = \left( \frac{n_s - n}{n_s} \right) \cdot P_\delta = \left( \frac{1000 - 905}{1000} \right) \cdot 2693,42 = 255,87 [W] \quad (5.1-5)$$

Dále musíme určit mechanické ztráty  $\Delta P_{mech}$ , k tomu nám poslouží grafické zobrazení ztrát v železe  $\Delta P_{Fe}$ .

Nyní potřebuji tyto ztráty v železe (které v sobě zahrnují rovněž i ztráty mechanické) rozdělit na čistě ztráty v magnetickém obvodu (závislé na napětí) a čistě na mechanické ztráty (závislé pouze na otáčkách). Pro lepší určení si graf vynesu na kvadrátu napětí:



(Obr. 20) Závislost ztrát v železe na kvadrátu napětí.

Protažením křivky do nuly získám velikost mechanických ztrát. Vynesením spojnice z kvadrátu jmenovitého napětí a promítnutím do y- osy získáme čistě velikost ztrát v železe.

Odečtené hodnoty ztrát:

Ztráty mechanické:

$$\Delta P_{mech} = 50 [W]$$

Ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = 260 [W]$$

Přepočet elektrického výkonu na mechanický:

$$P_{mech} = m_s \cdot \frac{1-s}{s} \cdot R_r \cdot I_r^2 = (1-s) \cdot P_\delta = (1-0,095) \cdot 2693,42 = 2437,54 [W] \quad (5.1-6)$$

Výkon na hřídeli motoru:

$$P = P_{mech} - \Delta P_{mech} = 2437,54 - 50 = 2387,55 [W] \quad (5.1-7)$$

## 6. Konstrukce kružnicového diagramu

### 6.1 Postup konstrukce kružnicového diagramu

Hodnoty potřebné ke konstrukci:

Naprázdný	Nakrátko	Odpor statoru
$I_0 = 6,23[A]$	$I_k = 4,59[A]$	$R_1 = 5,40[\Omega]$
$\cos\varphi_0 = 0,14$	$\cos\varphi_k = 0,66$	
$\Delta P_{mech} = 50[W]$	$U_k = 40,66[V]$	

(Tab. 5) Tabulka hodnot pro konstrukci kružnicového diagramu.

Proud nakrátko musíme přepočítat pro hodnotu jmenovitého napětí:

$$I_{KN} = I_k \cdot \left( \frac{U_n}{U'} \right) = 4,59 \cdot \left( \frac{220}{40,66} \right) = 24,83[A] \quad (6.1-1)$$

Podle velikosti proudu nakrátko  $I_{KN}$  si zvolíme měřítko proudu  $i_1$

$$i_1 = 1[A/cm]$$

Vypočteme si měřítko výkonů stroje:

$$m_p = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot i_1 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 1 = 658,18[W/cm] \quad (6.1-2)$$

Určíme si měřítko mechanických momentů:

$$m_m = \frac{60 \cdot m_p}{2 \cdot \pi \cdot n_s} = \frac{60 \cdot 658,18}{2 \cdot \pi \cdot 1000} = 6,28[Nm/cm] \quad (6.1-3)$$

Určení velikosti úsečky IJ, Tato úsečka představuje ztráty ve vinutí statoru:

$$IJ = \frac{1,5 \cdot R_1 \cdot I_k^2}{m_p} = \frac{1,5 \cdot 5,4 \cdot 24,83^2}{658,18} = 7,58[cm] \quad (6.1-4)$$

Hodnoty odečtené z kružnicového diagramu:

Pro jmenovitý proud  $I_N$  používáme měřítko proudu  $i_1$

$$I_N = 7,4 \cdot i_1 = 7,4 \cdot 1 = 7,4[A] \quad (6.1-5)$$

Účinit  $\cos \varphi_n$ :

$$\cos \varphi_n = 0,56 \quad (6.1-6)$$

Jmenovitý skluz:

$$S_n = 0,093 \quad (6.1-7)$$

Pro určení momentů používáme měřítko momentů  $m_n$

$$M_n = 3,1 \cdot m_m = 3,1 \cdot 6,28 = 19,468[Nm] \quad (6.1-8)$$

Maximální moment

$$M_{\max} = 9,2 \cdot m_m = 9,2 \cdot 6,28 = 57,776[Nm] \quad (6.1-9)$$

Záběrný moment:

$$M_{záb} = 7,4 \cdot m_n = 46,47[Nm] \quad (6.1-10)$$

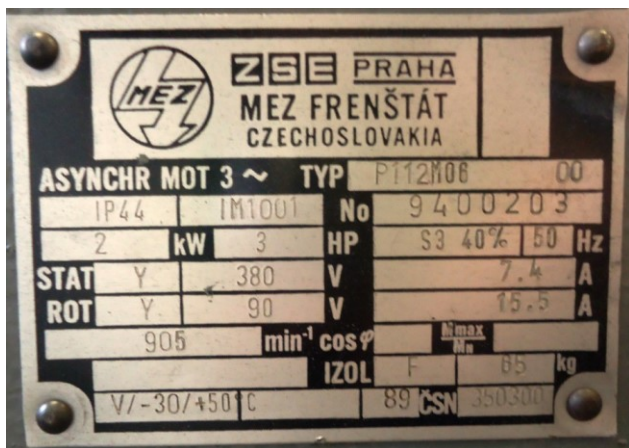
Maximální výkon:

$$P_{\max} = 5,9 \cdot m_p = 5,9 \cdot 658,18 = 3884[W] \quad (6.1-11)$$

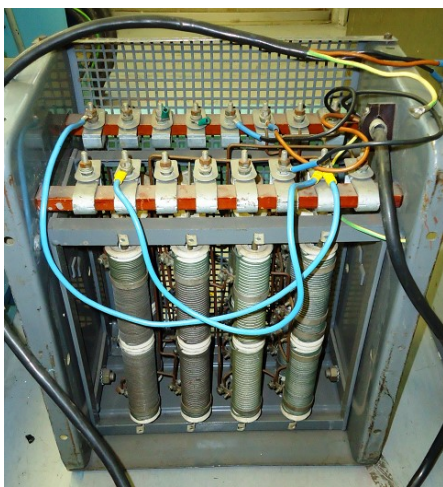
## 7. Analýza parametrů

### 7.1 Analýza momentu

#### 7.1.1 Měření jednotlivých odporových stupňů



(Obr. 21) Štítek měřeného motoru.



(Obr. 22) Použitý odporník

Ru-u5	0,07 $\Omega$	Rv-v5	0,08 $\Omega$	Rw-w5	0,08 $\Omega$
Ru-u4	0,36 $\Omega$	Rv-v4	0,36 $\Omega$	Rw-w4	0,38 $\Omega$
Ru-u3	0,98 $\Omega$	Rv-v3	0,99 $\Omega$	Rw-w3	0,99 $\Omega$
Ru-u2	2,42 $\Omega$	Rv-v2	2,51 $\Omega$	Rw-w2	2,43 $\Omega$
Ru-u1	5,2 $\Omega$	Rv-v1	5,21 $\Omega$	Rw-w1	5,24 $\Omega$

(Tab. 6) Hodnoty odporů jednotlivých odporových stupňů.

Bez zařazeného odporu		n1		n2		n3		n4		n5	
n (ot/min)	M (Nm)	n (ot/min)	M (Nm)	n (ot/min)	M (Nm)	n (ot/min)	M (Nm)	n (ot/min)	M (Nm)	n (ot/min)	M (Nm)
1000	0	1000	0	1000	0	1000	0	1000	0	1000	0
970	5,886	958,5	5,886	927,5	5,886	856	5,886	680	5,886	640	1,962
952	11,772	926	11,772	865,5	11,772	725	11,772	440	11,772	515	3,924
927,5	17,658	892	17,658	814	17,658	603	17,658	215	17,658	355	5,886
905,5	23,544	858	23,544	732	23,544	463	23,544	0	23,544	229	7,848

(Tab. 7) Vzorek naměřených hodnot pro spouštěcí odporník.

Výpočet pro n1, 3. řádek tabulky:

Hodnota momentu při sníženém napětí:

$$M' = 0,066 \cdot 10 = 0,66 [Nm] \quad (7.1.1-1)$$

Přepočet momentu na plné napětí:

$$M_n = M' \cdot \left( \frac{U_n}{U'} \right)^2 = 0,66 \cdot \left( \frac{380}{95} \right)^2 = 11,772 [Nm] \quad (7.1.1-2)$$

Otáčky	skluz	Bez odporu	n1	n2	n3	n4	n5
n(Ot/min)	s	M(Nm)	M(Nm)	M(Nm)	M(Nm)	M(Nm)	M(Nm)
100	0,9	59,5734	61,10069	54,1441	37,7167	21,02	11,3754
200	0,8	60,4629	60,87544	51,8675	34,9894	19,0844	10,222
300	0,7	60,9804	60,11836	49,053	31,9819	17,0601	9,04262
400	0,6	60,9081	58,61598	45,5881	28,6644	14,9428	7,83651
500	0,5	59,9038	56,06108	41,3322	25,0029	12,7277	6,60303
600	0,4	57,4175	52,0029	36,1089	20,9591	10,4098	5,34148
700	0,3	52,5366	45,76504	29,6948	16,4897	7,98394	4,05115
800	0,2	43,6865	36,30506	21,8038	11,5454	0,4437	2,7313
900	0,1	28,0123	21,96434	12,0666	6,07023	2,78517	1,38118
905	0,095	26,9681	21,07644	11,5232	5,7814	2,64896	1,31287
1000	1	0	0	0	0	0	0

(Tab. 8) Vypočítané hodnoty momentu pro jednotlivé stupně odporového spouštěče.

Výpočet momentu pro jednotlivé odporové stupně:

Skluz:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 100}{1000} = 0,9 \quad (7.1.1-3)$$

Střední hodnota 1. odporového stupně:

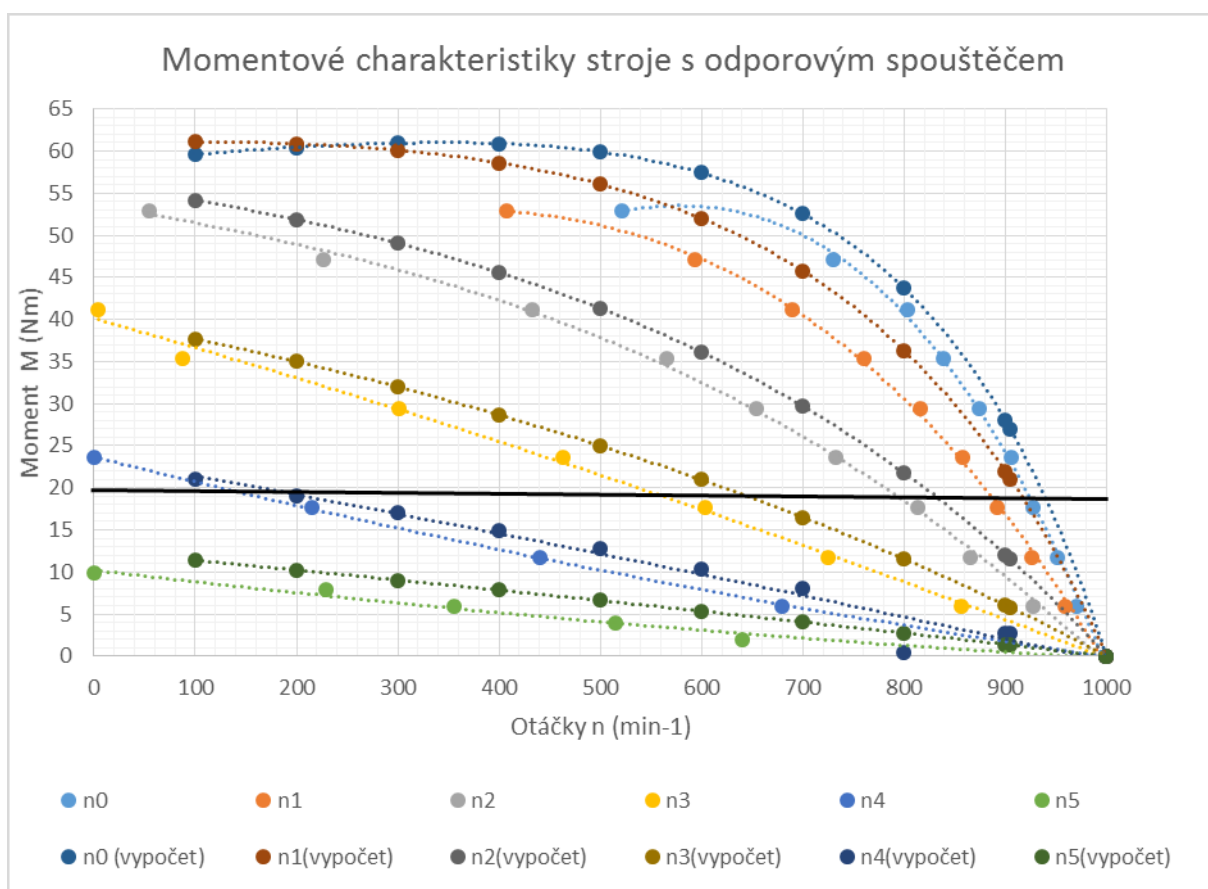
$$R_{n1} = \frac{R_u + R_v + R_w}{3} = \frac{0,07 + 0,08 + 0,08}{3} = 0,076 [\Omega] \quad (7.1.1-4)$$

Hodnota odporu přepočítaná na stator:

$$R_{2'} = R_{n1} \cdot \left( \frac{U_n}{U'} \right)^2 + R_2 = 0,076 \cdot \left( \frac{380}{90} \right)^2 + 3,62 = 4,975 [\Omega] \quad (7.1.1-5)$$

Dále počítáme moment za pomoci hodnot z náhradního schéma motoru:

$$M_{n1} = \frac{m_1 \cdot R'_{2'}}{\Omega_s \cdot s} \cdot \frac{U_1^2}{\left( R_1 + \frac{R'_{2'}}{s} \right)^2 + X_k^2} = \frac{3 \cdot 4,975}{107,71 \cdot 0,9} \cdot \frac{220^2}{\left( 5,4 + \frac{4,975}{0,9} \right)^2 + 5,71^2} = 61,100 [Nm]$$



(Obr. 23) Srovnání naměřených průběhů s vypočtenými.

	n0	n1	n2	n3	n4	n5
	n(Ot/min)	n(Ot/min)	n(Ot/min)	n(Ot/min)	n(Ot/min)	n(Ot/min)
<b>Měření</b>	920	883	790	550	150	-
<b>Výpočet</b>	940	915	830	635	190	-

(Tab. 9) Srovnání otáček pro jednotlivé stupně při jmenovitém momentu.

### 7.1.2 Hodnoty momentu získané z kružnicového diagramu:

Otáčky	Skluz	Kružnicový diagram	Moment
n(ot/min)	s	(cm)	M(Nm)
100	0,9	8	50,24
200	0,8	8,5	53,38
300	0,7	8,7	54,63
400	0,6	8,9	55,89
500	0,5	9,2	57,77
600	0,4	9,1	57,14
700	0,3	8,6	53,38
800	0,2	7,1	44,58
900	0,1	5	31,4
1000	1	0	0

(Tab. 10) Hodnoty momentu odečtené z kružnicového diagramu.

Výpočet pro 1. řádek tabulky:

Přepočet momentu z kružnicového diagramu:

$$M = 8 \cdot m_m = 8 \cdot 6,28 = 50,24[Nm] \quad (7.2-1)$$

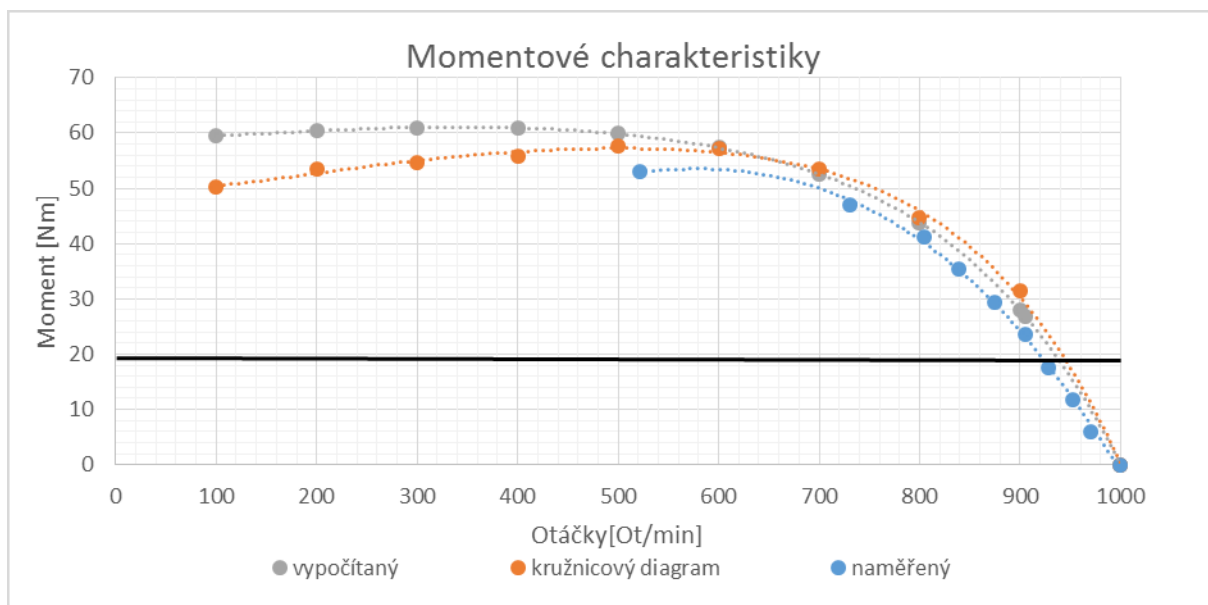
Otáčky	skluz	Moment
n(Ot/min)	s	M(Nm)
100	0,9	59,573
200	0,8	60,46
300	0,7	60,98
400	0,6	60,9
500	0,5	59,9
600	0,4	57,42
700	0,3	52,54
800	0,2	43,68
900	0,1	28,02
905	0,095	26,9
1000	1	0

(Tab. 11) Vypočítané hodnoty skluzu.

Výpočet pro 1. řádek tabulky:

Počítaný moment, je moment elektromagnetický. Jedná se moment ve vzduchové mezeře.

$$M_{n1} = \frac{m_1 \cdot R'_2}{\Omega_s \cdot s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_k^2} = \frac{3 \cdot 3,62}{107,71 \cdot 0,9} \cdot \frac{220^2}{\left(5,4 + \frac{3,62}{0,9}\right)^2 + 5,71^2} = 59,573[Nm] \quad (7.2-2)$$



(Obr. 24) Porovnání momentu motoru bez zařazeného odporového stupně.

Měření	Výpočet	Kruhový diagram
n(Ot/min)	n(Ot/min)	n(Ot/min)
920	940	945

(Tab. 12) Porovnání otáček při jmenovitém momentu.

## 7.2 Analýza proudu

### 7.2.1 Analýza rotorového proudu bez spouštěcího odporníku

Skluz s (-)	Otáčky n(ot/min)	Statorový proud	
		Vypočítaná I (A)	Proud z kružnicového diagramu I(A)
100	0,9	24,16	23,11
200	0,8	23,11	22,4
300	0,7	21,91	21,5
400	0,6	20,51	20,4
500	0,5	18,86	18,7
600	0,4	16,88	15,2
700	0,3	14,47	13,4
800	0,2	11,57	9,8
900	0,1	8,11	7,5
1000	0	7,9	7,4

(Tab.13) Vypočítané a odečtené hodnoty statorového proudu.



Výpočet statorového proudu  $I_1$  z hodnot známých z náhradního schéma motoru.

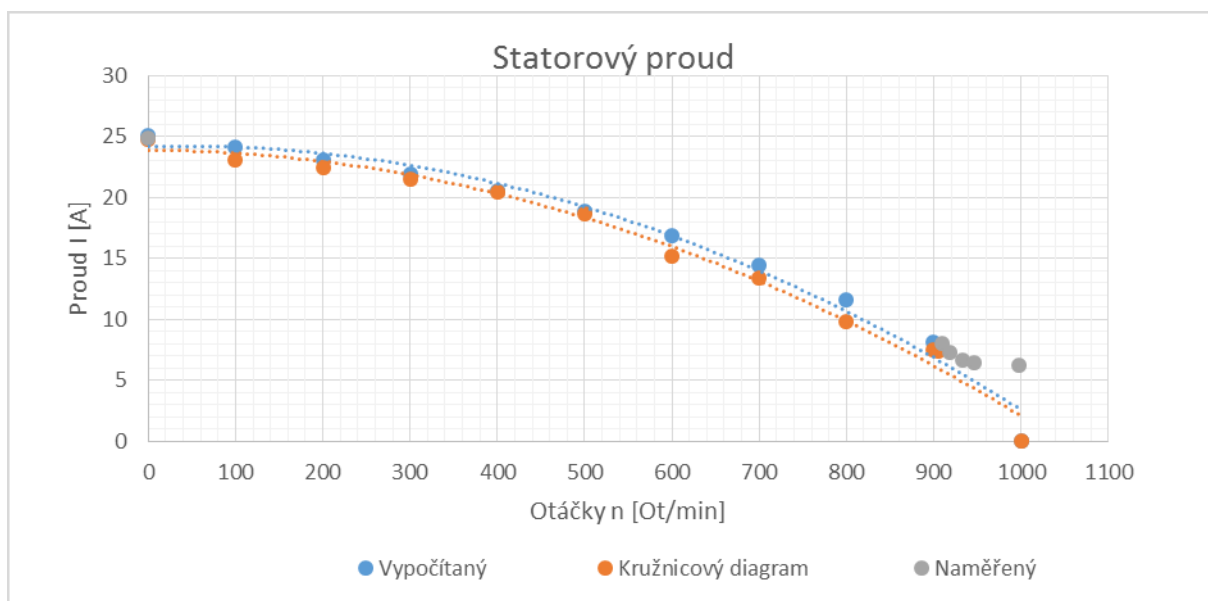
Výpočet pro 1. řádek tabulky.

$$I_{21} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2 + X_k^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(5,4 + \frac{3,62}{0,9}\right)^2 + 5,71^2}} = 19,96[A] \quad (7.2.1-1)$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{21\sigma}}{\sqrt{\left(\frac{R_{21}}{s}\right)^2 + X_{21\sigma}^2}} = \frac{\frac{5,71}{2}}{\sqrt{\left(\frac{3,62}{0,9}\right)^2 + \left(\frac{5,71}{2}\right)^2}} = 0,654 \quad (7.2.1-2)$$

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{21}^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{I_\mu}{I_{21}} \cdot \sin \varphi_2\right)} = \sqrt{5,8^2 + 19,96^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{5,8}{19,96} \cdot 0,654\right)} = 24,16[A]$$

(7.2.1-3)



(Obr. 25) Srovnání statorového proudu.

	Otáčky	Výpočet	Kružnicový diagram	Měření
	$n$ (Ot/min)	$I$ (A)	$I$ (A)	$I$ (A)
Synchronní ot.	1000	2,9	2,2	6,23
Jmenovité ot.	905	8	7	7,5
Záběrné ot.	0	25	24,83	24

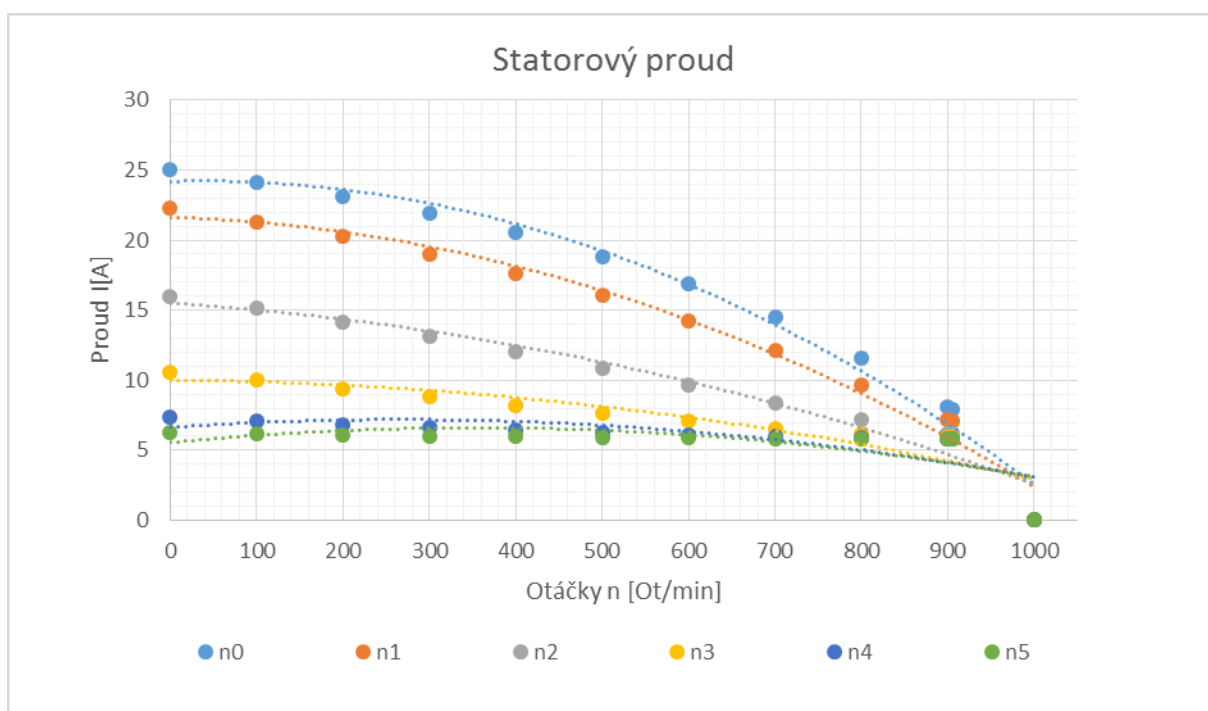
(Tab. 14) Srovnání proudů při odlišných otáčkách motoru.

### 7.2.2 Analýza rotorového proudu při připojení rotorového spouštěče

Otáčky n(Ot/min)	Skluz (-)	n0 I(A)	n1 I(A)	n2 I(A)	n3 I(A)	n4 I(A)	n5 I(A)
100	0,9	24,16	21,31	15,11	10,01	7,09	6,16
200	0,8	23,11	20,25	14,16	9,41	6,86	6,09
300	0,7	21,91	19,04	13,14	8,81	6,64	6,03
400	0,6	20,51	17,66	12,053	8,21	6,44	5,97
500	0,5	18,86	16,07	10,88	7,63	6,29	5,92
600	0,4	16,88	14,21	9,65	7,08	6,1	5,87
700	0,3	14,47	12,11	8,39	6,58	5,97	5,84
800	0,2	11,57	9,7	7,19	6,17	5,88	5,82
900	0,1	8,11	7,21	6,21	5,9	5,82	5,805
1000	0	7,9	7,1	6,17	5,89	5,81	5,8

(Tab.15 ) Proudý pro jednotlivé odporové stupně.

Při výpočtu statorových proudů postupujeme stejně jako v předchozí kapitole (7.2.1). Výpočet provádíme podle rovnic (7.2.1-1), (7.2.1-2),(7.2.1-3).



(Obr. 26) Průběhy statorového proudu při zařazených odporových stupních.

## Vyhodnocení měření:

Prvotním úkolem bylo měření základních charakteristik motoru, provést tedy měření naprázdno, nakrátko, měření pracovních charakteristik a měření momentové charakteristiky. Tato měření jsem použil pro následnou analýzu mnou použitého motoru. V první části své analýzy jsem se zabýval energetickou bilancí stroje. Rozdělení jednotlivých ztrát je patrné z tab:

$P_p$ [W]	$\Delta P_{j1}$ [W]	$\Delta P_{fe}$ [W]	$\Delta P_{j2}$ [W]	$\Delta P_{mech}$ [W]	$P$ [W]
3418,11	443,556	260	255,87	50	2387,55

Z grafů je patrné, že největší účinnosti stroj dosahuje v oblasti cca  $0,75 \cdot P_n$  zatížení. V této oblasti se ztráty nakrátko rovnají ztrátám naprázdno.

V dalším kroku jsem se zaměřil na konstrukci kružnicového diagramu, který je uveden v příloze. Z kružnicového diagramu jsem provedl odečet důležitých veličin stroje:

$I_n$ [A]	$\cos \varphi_n$	$s_n$	$M_n$ [Nm]	$M_{Záb}$ [Nm]	$M_{max}$ [Nm]
7,4	0,56	0,039	19,46	46,47	57,77

Takto určené parametry stroje je možné porovnat se štítkem stroje a s provedeným měřením:

$I_n$ [A]	$\cos \varphi_n$	$s_n$	$M_n$ [Nm]
7,4	0,6	0,095	19,1

V následující části jsem provedl analýzu stroje z hlediska vlivu rotorového odporu. Jak jsem uvedl v teoretické části své práce, kroužkové motory se vyznačují možností změny odporu rotoru, což ses výhodou používá mimo jiné pro zvýšení záběrného momentu při současném snížení záběrného proudu. Měřil jsem motor připojený na 5-stupňový spouštěcí odporník. Graf je uveden na obr. 23. Porovnáním vyplývá následující:

$n1$	$n2$	$n3$	$n4$	$n5$
[Ot/min]	[Ot/min]	[Ot/min]	[Ot/min]	[Ot/min]
883	790	550	150	-

V závěrné části své práce jsem se zabýval podrobnou analýzou momentové charakteristiky a také vlivem rotorového odporu. Změřené momentové charakteristiky jsem porovnal s výpočtem (7.2-2). Graf je uveden na obr. 23

Průběh přirozené momentové charakteristiky je rovněž možné porovnat s charakteristikou získanou z kružnicového diagramu. Graf je uveden na obr. 24. Pro jmenovitý moment patrné:

Měření	Kružnicový diagram
[Ot/min]	[Ot/min]
920	945

Závěrem jsem provedl výpočet průběhu satorového proudu pro jednotlivé odporové stupně. S přihlédnutím na průběhy momentových charakteristik mohu provést porovnání při jmenovitých otáčkách pro jednotlivé odporové stupně:

	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$
Moment[Nm]	26,92	21,07	11,52	5,78	2,64	1,31
Proud [I]	8,11	7,21	6,21	5,9	5,82	5,8

## Závěr

Svou práci jsem zaměřil na analýzu konkrétního kroužkového motoru s detailním rozбором vlivu změny velikosti rotorového odporu na jeho chování. V úvodní kapitole své práce jsem provedl základní měření motoru, které bylo nezbytné pro provedení hlubšího rozboru. Díky provedeným měřením jsem byl schopen určit energetickou bilanci stroje a určit podíl jednotlivých ztrát při chodu stroje ve své pracovní oblasti. Měření jsem rovněž použil pro konstrukci kružnicového diagramu, pomocí kterého jsem rovněž provedl analýzu mnou použitého motoru a který je uveden v příloze této práce. Základní parametry z měření a odečtu z kružnicového diagramu jsem chtěl porovnat s teoretickými předpoklady. Za tímto účelem jsem provedl výpočet prvků náhradního schématu stroje a tyto parametry jsem v následujících kapitolách své práce používal pro výpočet elektromagnetického momentu a statorového proudu stroje, jelikož jsem se rozhodl právě tyto dvě základní veličiny motoru podrobit podrobnější analýze. Kroužkové motory se často používají pro svou možnost zvětšování rotorového odporu. Provedl jsem měření pro posouzení vlivu právě takto zvyšovaného rotorového odporu. Takto provedené měření jsem porovnal s výpočty. Porovnáním jsem jednak verifikoval svá měření a rovněž si potvrdil skutečnost, že zvyšování odporu má vliv na zvyšování záběrného momentu a snižování záběrného proudu. V konečné analýze momentu a statorového proudu jsem se touto problematikou dostatečně věnoval.

Takto provedenou analýzu stroje, která je zaměřena nejen na měření, ale také na použití teoretických výpočtů z náhradního schématu a odečtu z kružnicového diagramu, považuji za největší přínos mé práce. Studentům, kteří by chtěli na mou práci navázat, bych doporučil se zabývat podrobněji analýzou stroje napájeného do rotoru, tzv. nadsynchronní kaskádou.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. Vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002.
- [2] KEPPERT, Svetozar. *Elektrické stroje 3. Indukční stroje*. 2. Vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1978.
- [3] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. 1. Vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [4] MĚŘIČKA, Jiří a Zdeněk ZOUBEK. *Elektrické stroje*. 3. Vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze Ediční středisko ČVUT, 1982.
- [5] HRABOVCOVÁ, Valéria, Pavol RAFAJDUS, Marek FRANKO a Peter HUDÁK. *Meranie a Modelácie Elektrických Strojov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2009.
- [6] RUSNOK, Stanislav a Pavel SOBOTA. *Cvičení z Elektrických strojů*, Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2013.
- [7] UHLÍŘ, Ivan et al. *Elektrické stroje a pohony*. 1. Vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02482-2.
- [8] KOCMAN, Karel, Jozef HOLBA, Alexander IHLÁR a Rudolf MRAVENEC. *Elektrické stroje a přístroje I*. 1. Vyd. Josef ŘÍHA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, ISBN 80-03-00406-3.

## **Seznam příloh**

Příloha 1 Kružnicový diagram, výkres formát A3.